中国战略性新兴产业研究与发展

R&D of China's Strategic New Industries

内燃机

Wind Energy

国家仪表功能材料工程技术研究中心 组编
刘庆宾 主编

机械工业出版社
China Machine Press

中国战略性新兴产业研究与发展

内　燃　机

中国内燃机工业协会　组编

邢　　敏　主编

机械工业出版社
China Machine Press

本书分 8 章，主要对内燃机行业的战略地位、基础与现状、发展趋势、差距和问题、目标、创新体系建设、产业可持续发展等问题进行了全面、系统的分析研究，对内燃机的未来发展提出了具有指导意义的建议。其中，第 1 章、第 2 章着重从内燃机产业对国家重大装备和重点工程的支撑作用、内燃机的节能减排等方面，阐明我国内燃机产业的战略地位，介绍了内燃机产业结构、新技术等方面的发展情况。第 3 章、第 4 章分析了发达国家内燃机产业的技术水平和规模，对我国内燃机产业结构、产品技术、核心零部件及政策法规等方面存在的不足和差距进行了论述。第 5 ～ 8 章提出内燃机产业的发展战略和目标，阐述了创新体系建设方面需要开展的工作，分析了推动行业可持续发展所需突破的关键技术，提出相关推动产业发展的政策性措施和建议。

本书资料详实，具有一定的思想、理论深度，适合各级政府和行业决策机构制定政策法规、学术研究机构规划研究方向参考，也适合企业决策者，技术、管理及市场人员，以及投资、证券行业及咨询机构的人员在规划、投资、研究、项目实施中使用。

图书在版编目（CIP）数据

中国战略性新兴产业研究与发展．内燃机 / 邢敏主编；中国内燃机工业协会组编．—北京：机械工业出版社，2017.6
ISBN 978-7-111-57115-5

Ⅰ．①中… Ⅱ．①邢…②中… Ⅲ．①新兴产业－产业发展－研究－中国②内燃机工业－产业发展－研究－中国 Ⅳ．①F269.24 ②F426.42

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2017）第 139670 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号　邮政编码 100037）
责任编辑：袁士华　王　良　　责任校对：赵　蕊
北京宝昌彩色印刷有限公司印制
2017 年 8 月第 1 版第 1 次印刷
170mm×242mm • 22 印张 • 378 千字
标准书号：ISBN 978-7-111-57115-5
定价：138.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务	网络服务
社服务中心：(010)88361066	年 鉴 网：http://www.cmiy.com
销 售 一 部：(010)68326294	机工官网：http://www.cmpbook.com
销 售 二 部：(010)88379649	机工官博：http://weibo.com/cmp1952
读者购书热线：(010)68326643	封面无机械工业出版社专用防伪标均为盗版

《中国战略性新兴产业研究与发展》

编委会

主　任　路甬祥　第十届、十一届全国人大常委会副委员长，中国科学院院士、中国工程院院士

副主任　苏　波　中纪委驻中央统战部纪检组组长

王文斌　中国机械工业联合会副会长、机械工业信息研究院院长、机械工业出版社社长

委　员　（按姓氏笔画排序）

石　勇　机械工业信息研究院副院长

冯金尧　中国机械通用零部件工业协会紧固件分会会长

邢　敏　中国内燃机工业协会常务副会长兼秘书长

刘庆宾　重庆材料研究院有限公司董事长兼总经理、中国仪器仪表行业协会仪表功能材料分会理事长

孙容磊　华中科技大学教授、中国人工智能学会智能制造专业委员会秘书长

吴正元　中国塑料加工工业协会专家委员会委员、南京聚隆科技股份有限公司、南京聚锋新材料有限公司名誉董事长

于庆瑞　甘肃长城电工电器工程研究院有限公司院长、天水长城开关厂有限公司总工程师

陆大明　中国机械工程学会副理事长兼秘书长

武兵书　中国模具工业协会常务副会长兼秘书长

赵志明　中国石油和石油化工设备工业协会首席顾问

徐东华　机械工业经济管理研究院院长、国务院发展研究中心研究员

郭　锐　机械工业信息研究院副院长、机械工业出版社总编辑

蒋善武　天安电气集团有限公司总裁

景晓波　工业和信息化部运行监测协调局副巡视员

谢三明　工业和信息化部运行监测协调局监测预测处处长

樊高定　中国制冷空调工业协会常务副理事长

瞿金平　华南理工大学教授、中国工程院院士

《中国战略性新兴产业研究与发展·内燃机》

执行编委会

主　　编　邢　敏

副 主 编　王　忠　姚春德　魏安力

撰 稿 人　马朝臣　王　玉　王　忠　王天友　计维斌　邓康耀
平　涛　冯长虹　吕　林　朱　丽　朱元宪　刘瑞林
刘献丰　闫晓娜　李　勤　李云强　李方义　李玉峰
李金成　李建华　李理光　杨冬霞　吴旭陵　吴新潮
佟德辉　张克金　陆宪忠　陈小迅　林铁坚　居钰生
胡铁刚　姚春德　贾　滨　康　凯　葛　红　詹　华
詹樟松　戴松高　魏安力

《中国战略性新兴产业研究与发展》

编委会办公室

主　　任　石　勇（兼）

副 主 任　李卫玲

成　　员　刘世博　任智惠　董　蕾　李　晶

序言

全球金融危机和经济衰退发生以来，美欧日俄等各国为应对危机、复苏经济、抢占未来发展的先机和制高点，都在重新审视发展战略，不断加快推进“再工业化”，培育发展以新能源、节能环保低碳、生物医药、新材料与高端制造、新一代信息网络、智能电网、海洋空天等技术为支撑的战略性新兴产业，在全球范围内构建以战略性新兴产业为主导的新产业体系。力图通过新一轮的技术革命引领，重新回归实体经济，创造新的经济增长点。这已成为很多国家摆脱危机、实现增长、提升综合国力的根本出路。可以预计，未来的二三十年将是世界大创新、大变革、大调整的历史时期，人类将进入一个以绿色、智能、可持续发展为特征的知识文明时代。那些更多掌握绿色、智能技术，主导战略性新兴产业发展方向的国家和民族将在未来全球竞争合作中占据主导地位，赢得全球竞争合作，共享持续繁荣进程中的主动权和优势地位。

为应对金融危机和全球性经济衰退以及日趋强化的能源、资源和生态环境约束，以实现中国经济社会的科学发展、和谐发展、持续发展，党中央、国务院提出加快调整产业结构、转变经济发展方式，加快培育和促进战略性新兴产业发展的方针，出台了《国务院关于加快培育和发展战略性新兴产业的决定》以及相关政策举措。可以肯定，未来 5 ～ 10 年将是我国结构调整与改革创新发展的一个新的战略机遇期，将通过继续深化改革，扩大开放，提升自主创新能力，建设创新型国家，实现我国科技、产业、经济由大变强的历史性跨越，我国经济社会发展将走出一条依靠创新驱动，绿色智能，科学发展、和谐发展、持续发展之路，实现中华民族的伟大复兴。

展望未来，高端装备制造、新能源汽车、节能环保、新一代信息技术、生物医药、新能源、新材料、绿色运载工具、海洋空天、公共安全等全球战略性新兴产业将形成十数万亿美元规模的宏大产业，成为发展速度最快，采用高新技术最为密集，最具持续增长潜力的产业群落。战略性

新兴产业的发展需求也将拉动技术的创新突破和产业的结构调整，为包括我国在内的全球经济发展注入新的强大动力。

在世界各国高度重视培育和发展战略性新兴产业的新形势下，编著一套《中国战略性新兴产业研究与发展》图书，借鉴国外相关产业发展的成功经验，对行业发展思路、发展目标、发展战略、发展重点、投资方向、政策建议等方面进行全面、系统研究，凝聚对战略性新兴产业内涵和发展重点的认识，为国家战略性新兴产业发展规划的顺利实施，以及政府和有关部门制定促进战略性新兴产业发展的相关政策和法规提供参考，具有十分重要的现实意义。

《中国战略性新兴产业研究与发展》系列图书对相应产业的阐述、分析均注重强调战略性新兴产业的六个主要特点：

一是**绿色**。战略性新兴产业属于能耗低、排放少、零部件可再生循环的“环保型”“绿色型”产业，无论从产品的设计、制造、使用，还是回收、再利用等整个生命周期的各个环节，对资源的利用效率与对环境的承载压力均要求达到最理想水平。

二是**智能**。新型工业化要求坚持以信息化带动工业化、以工业化促进信息化，即要实现“两化融合”。而“两化融合”决定了智能是未来产业尤其是战略性新兴产业的发展方向。所谓智能，是指制造过程的智能化、产品本身的智能化、服务方式的智能化。这些均是智能的最基本层次，它还具有其他更为丰富的内涵。如：智能电网，通过先进的传感和测量技术、先进的设备技术、先进的控制方法以及先进的决策支持系统技术的应用，可实现电网的可靠、安全、经济、高效、环境友好和系统安全等方面的智能；智能汽车不只是安全智能，还包括节能、减排、故障预警等方面的智能。

三是**全球制造**。随着全球化趋势不断深化，战略性新兴产业的发展成果也必将是由全人类共创共享。新产品的研制开发，不再由一个企业独自完成，需要集成各方面优势资源共同解决。例如 iPhone 在中国完成装配，但它的设计、研发以及许多零部件的供应都是在美国、日本、欧洲等国实现的，其本身就是一个全球化的产品。因而，未来的制造必

然是全球化制造、网络化制造。

四是**满足个性化需求与为更多人分享相结合**。目前中国有 13 亿人口，印度有 12 亿人口，还有巴西、印度尼西亚等新兴国家、发展中国家也都要实现现代化。在全球如此规模庞大的人群中，既存在富裕阶层、高消费阶层，他们的消费需求是个性化、多样化的；又有占比较大的中产阶层、贫困人口，他们的消费需求是基本层次的，但也不能被忽视。两种类型的消费需求必须同时被满足，这不仅是构建和谐社会的需要，而且是构建和谐世界的需要。因此，我国发展战略性新兴产业，应该既要满足中高端个性化的需求，同时又要满足我国与其他发展中国家广大普通消费者的需求。要把个性化的设计、个性化的产品生产，与规模化、工业化的传统生产结合起来，不能完全抛弃传统的规模化生产方式。

五是**可持续**。要使有限的自然资源得以有效、可持续利用，发展利用可再生资源、能源，强调发展再制造、循环经济。无论是原材料使用，还是零部件制造，从研发、设计之初就考虑到了生产中的废料、使用后的遗骸的回收处置，使其能够重新得到循环利用。

六是**增值服务**。培育发展战略性新兴产业需要注意在设计制造过程中与产品售后、使用过程中提供相关增值服务。不应再局限于传统的观念，只注重制造本身，而不注重服务的价值。例如，发展电动汽车产业，必须首先解决好商业模式问题，包括充电桩建设、电池更换、废旧电池回收等服务方面，否则将无法广泛推广。

《中国战略性新兴产业研究与发展》系列图书内容丰富，资料翔实，观点鲜明，立意高远，并力求充分体现出“四性”，即科学性、前瞻性、指导性和基础性。

第一，体现**科学性**。所谓科学性，就是指以科学发展观为指导。科学发展观的核心是以人为本，总体目标是全面、协调、可持续，基本方法是统筹兼顾，符合客观规律。《中国战略性新兴产业研究与发展》系列图书既要能够为党中央、国务院提出的加快发展战略性新兴产业的总体战略服务，又不应受到行业、部门的局限，更不能写成规划或某些部门规划的解读材料，而应能够立足于事物客观规律、立足于全局。各分

册编写组同志重视调查、研究，力求对国情、科技、产业及全球相关产业的发展态势有比较准确的把握，努力为我国战略性新兴产业的发展提供一本基于科学基础的好素材。这套图书立足基于我国国情，而不是简单地把发达国家的相关产业信息进行综合、编译，照搬照抄。当然，我国发展战略性新兴产业不能“闭门造车”，而是要坚持开放性，积极参与国际分工合作，充分利用全球优势资源，提高发展的起点和水平。因而，有必要参照国际成功经验与最新发展趋势，但一定要以我国国情和产业特点为根本出发点，加快培育和发展有中国特色的、竞争能力强的战略性新兴产业。

第二，体现**前瞻性**。一是能够前瞻战略性新兴产业的发展，因为这套图书是战略性新兴产业的发展指导书。二是能够前瞻战略性新兴产业技术的发展。为了做好这两个前瞻，必须要适当地前瞻全球经济、我国经济与战略性新兴产业发展的趋势。只讲发展现状是不够的，因为关于现状的资料很多，通过简单地网络搜索即可查到；也不能只罗列国外的某些规划和发展战略。《中国战略性新兴产业研究与发展》系列图书的编写注重有深度的科学分析与前瞻性的研究。

第三，体现**指导性**。《中国战略性新兴产业研究与发展》系列图书本身就是指导书，能够对产业、对技术、对国家制定政策，甚至在未来国家发展战略与规划的制定等方面发挥一定的引导作用与影响。虽然不能说这套图书可以指导国家战略与规划的制定，但是应该努力发挥其积极的引导作用。

第四，体现**基础性**。所谓基础性，就是指要能够提供战略性新兴产业的基础信息、基础知识，以及我国和有关国家在相关产业发展方面的基本战略，主要的法规、政策和举措，并尽可能提供一些基本的技术路线图。比如在轴承分册，就描述了一个轴承产业发展的路线图。唯有如此，《中国战略性新兴产业研究与发展》系列图书才能满足原来立项的宗旨 —— 不仅要为工程技术界、大学教师、大学生与研究生提供学习参考书，为产业界的技术人员、管理人员提供决策参照，而且要为政府部门的政策法规制定者提供参考。

机械工业出版社是具有60年历史的专业性综合型出版机构，改革开放后，随着市场经济的发展，机械工业出版社不断改革转型，不但形成了完善的编辑出版工作流程和质量保证体系，而且编辑人员作风严谨，工作创新。

《中国战略性新兴产业研究与发展》系列图书不仅是一套科技普及书，更是一套产业发展参考书，必须既要介绍国内外战略性新兴产业的发展情况，又要阐述相关政策、法规、扶植措施等内容。因此，这套图书的组编单位、编写负责人和编写工作人员必须要有相关积累和优势。《中国战略性新兴产业研究与发展》系列图书所选的分册主编和作者主要是精力充沛的业内中青年专家，并由资深专家负责相应的编审、校审工作。现在看来大多数工作由中青年同志担当，是完全符合实际的。此外，这套图书的编著还充分发挥了有关科研院所、行业学会和协会的作用，他们的优势在于对行业比较熟悉，并掌握了较为丰富的资料。

最后，特别感谢国家出版基金对《中国战略性新兴产业研究与发展》系列图书的大力支持！感谢全体编写出版人员的辛勤劳动！

期望《中国战略性新兴产业研究与发展》为社会各界了解战略性新兴产业提供帮助，期待中国战略性新兴产业培育和发展尽快取得重大突破，祝愿我国在不久的将来实现由经济大国向经济强国的历史性跨越！

是为序。

2012年2月6日于北京

前言

内燃机是汽车、摩托车、工程机械、农业机械、船舶、铁道内燃机车、内燃发电设备、国防装备、地质和石油钻机、旅游运动器械、园林机械和各种通用机械的主导配套动力，在我国交通运输基础设施建设、机场和港口建设、农业现代化、国防现代化以及促进经济发展、提高城乡居民生活水平等方面发挥着重要作用。内燃机工业是我国重要的基础、战略性新兴产业。

新中国成立以来，我国内燃机工业取得了长足进步，逐步建立了较为独立完整的制造体系。改革开放后，我国内燃机工业迎来了提升内燃机技术水平的发展良机，在我国加入 WTO 后，也遇到了激烈的市场竞争。

“十一五”期间，内燃机作为基础产业，为响应国家“装备制造业调整和振兴规划”“汽车产业调整和振兴规划”，面对国内外两个市场竞争与挑战，抓住新的发展机遇，加快调整产业结构和产品结构，以节能减排为主线，分析差距，提出措施，推进内燃机产业结构升级，提高内燃机产品的国际竞争力，结合国外先进技术自主研制开发了一大批为汽车、摩托车、工程机械及国防装备等配套的新一代先进发动机产品，为汽车工业的发展发挥了重要的支撑作用。

“十二五”期间，国务院颁布了国发〔2012〕28 号《“十二五”国家战略性新兴产业发展规划》《国家重大技术装备研制和重大产业技术开发专项规划》，明确指出了交通运输、工业、农业、船舶、电力等行业重点工程和重大装备配套内燃机的国内制造计划。内燃机行业根据国民经济发展要求，不断对产品结构和企业结构进行调整，通过自行研制开发和引进国外先进技术，发展了一大批新产品。

2013 年 2 月国办发〔2013〕12 号《国务院办公厅关于加强内燃机工业节能减排的意见》，提出了我国内燃机发展的总体要求、重点领域和任务，为迅速提高我国内燃机产业的创新能力，提升产品竞争

力指明了方向。我国的内燃机生产企业通过产学研结合，先后开发出一批满足国Ⅲ、国Ⅳ、国Ⅴ、国Ⅵ的发动机，生产出了一批可供汽车、摩托车、工程机械、船舶、农业机械、铁道内燃机车、内燃发电设备、石油钻机等产品选择配套的发动机机型，产品的结构趋向合理，产品质量和技术经济水平明显提高，我国已成为全球内燃机生产和使用大国。

在新的经济增长模式下，国家提出的“丝绸之路经济带”和“21世纪海上丝绸之路”的“一带一路”战略，铁路、公路、油气管道、跨界桥梁、输电线路、光缆传输系统等基础设施建设是“一带一路”互联互通的基础，内燃机是“一带一路”基础设施建设的主要动力。国务院颁布的《中国制造2025》（国发〔2015〕28号），提出的10大重点突破领域中，航空航天装备、海洋工程装备及高技术船舶、先进轨道交通装备、节能与新能源汽车、电力装备、农业机械装备等6大领域对内燃机工业提出了新的需求，也给内燃机工业提供了创新发展的机遇。

我国内燃机工业依然存在大而不强，自主创新能力弱，关键核心技术与高端装备对外依存度高，信息化水平低，资源能源利用效率低，环境污染严重等问题。当前我国的内燃机工业体系必须从量的变化转向质的提升。

作为战略性新兴产业的重要组成部分，内燃机工业是发展战略性新兴产业的动力来源，不仅在经济上对战略性新兴产业具有极大的拉动和支撑作用，其在政治上和军事上还具有十分重要的现实意义。加快以高效节能内燃机为代表的高端装备制造业的发展，不仅能整体提升我国内燃机产业的市场竞争力，而且将更精密地切入国内其他战略性新兴产业的需求。

《中国战略性新兴产业研究与发展·内燃机》的编写，是以国家

相关发展政策和规划为基础，借鉴国内外相关产业发展的成功经验，对产业发展思路、发展目标、发展战略、发展重点、投资方向、政策建议等方面进行了全面系统的研究，对前瞻性、基础性和目前产业上有瓶颈限制的问题提出了有针对性的对策，探讨我国内燃机工业在节能减排新形势下的发展思路。主要目的：一是要突破内燃机产品的关键核心技术和生产制造基础技术的瓶颈，提高在内燃机高端制造技术和核心零部件领域拥有的自主知识产权比例，打造多个国际知名品牌；二是要改变我国内燃机工业大而不强的局面，指明内燃机产品发展的技术路线，提高内燃机产品的节能、降耗、减排的技术水平。

《中国战略性新兴产业研究与发展·内燃机》的编写，也是为了促进各级政府、基层单位及广大群众对内燃机战略性新兴产业的关注力度，为国家战略性新兴产业发展规划的顺利实施提供系统指导，统一各级机构对战略性新兴产业内涵和发展重点的认识，为政府、行业管理机构统筹布局战略性新兴产业提供建议，为制定战略性新兴产业相关政策和法规提供参考依据。

本书编委会受机械工业出版社承担的国家出版基金项目的委托，由中国内燃机工业协会组织了内燃机行业的高等院校、研究机构、生产企业的专家，依据我国内燃机整机和零部件相关企业提供的资料，参考本书所附文献目录中有关内容编写而成的。

《中国战略性新兴产业研究与发展·内燃机》全书共分八章。第一章着重从内燃机产业对国家重大装备和重点工程的支撑作用、内燃机的节能减排等方面，阐明了我国内燃机产业的战略地位。第二章以我国内燃机产业与战略性新兴产业的关系为切入点，详细介绍了我国内燃机产业结构、主要产品、新技术、对外交流合作等方面的发展情况。第三章分析了欧洲、美国、日本等国家和地区的内燃机产业发展历程和特点，分析了先进国家内燃机产业的技术水平和规模。第四章对我国内燃机产业结构、产能规模、产品与技术、核心零部件以及政策法规等方面存在的不足和差距进行了论述。第五章提出了我国内燃机产业发展的指导思想和发展战略，提出了产业发展目标、结构调整、转型升级、产品以及市场服务目标。第六章阐述了内燃机产业在创新

体系建设方面需要开展的主要工作。第七章着重分析了推动我国内燃机产业可持续发展所需要突破的内燃机产品的关键技术。第八章围绕提高创新能力、加快结构调整、推动产业升级等方面，提出了相关推动产业发展的政策性措施和建议。

为了更好地让读者全面理解、准确把握、深刻领会《国务院关于加快培育和发展战略性新兴产业的决定》的精神实质，了解其发展内涵，推动内燃机产业结构升级和经济发展方式转变，增强国际竞争优势，抢占新一轮经济和科技制高点，中国内燃机工业协会在国家出版基金支持下，建立和完善图书项目管理及编写组织的工作体系，保证图书质量，组织行业权威专家，规划内容结构，研讨内容特色，不计报酬，不辞辛苦，把自己的知识与才智奉献给行业社会，编写了《中国战略性新兴产业研究与发展·内燃机》分册。此书涉及面广，内容丰富，资料详实，观点鲜明，立意长远，充分体现了科学性、前瞻性、指导性和基础性，但由于编者经验不足，水平有限，书中难免存在缺陷和不足，恳请广大读者不吝赐教，指出错误，提出建议。

2017 年 6 月

编写说明

《国务院关于加快培育和发展战略性新兴产业的决定》确定了我国未来经济社会发展的战略重点和方向是战略性新兴产业，并且根据我国国情和科技、产业基础，又制定出现阶段重点发展节能环保、新一代信息技术、生物、高端装备制造、新能源、新材料、新能源汽车七大新兴产业。可见，未来几年七大战略性新兴产业将是国家重点支持、大力推广的产业。

为了使大家全面理解、准确把握、深刻领会国家这一战略决定的精神实质，了解其发展内涵，推动产业结构升级和经济发展方式转变，增强国际竞争优势，抢占新一轮经济和科技制高点，机械工业出版社在国家出版基金的支持下，组织各领域权威专家编写了一套《中国战略性新兴产业研究与发展》（以下简称《研究与发展》）图书。

《研究与发展》以国家相关发展政策和规划为基础，借鉴国外相关产业发展的成功经验，对产业发展思路、发展目标、发展战略、发展重点、投资方向、政策建议等方面进行了全面、系统的研究；对前瞻性、基础性和目前产业上有瓶颈限制的问题提出了有针对性的对策。

《研究与发展》采用分期分批的出版方式陆续出版发行，第一期12个分册图书已于2013年底完成出版，包括：太阳能、风能、生物质能、智能电网、新能源汽车、轨道交通、工程机械、水电设备、农业机械、数控机床、轴承和齿轮。本次出版第二期13个分册图书，包括：功能材料、物流仓储装备、紧固件、模具、内燃机、塑料机械、塑木复合材料、物联网、制冷空调、智能制造装备、非常规油气、中压开关和工业网络信息安全。今后根据国家产业政策要求及各行业的发展情况还将陆续推出其他分册。

为了出版好《研究与发展》，机械工业出版社成立了《中国战略性新兴产业研究与发展》编委会，全国人大常委会原副委员长路甬祥

担任编委会主任。路甬祥副委员长对该套图书的编写高度重视，亲自参加编委研讨会，多次提出重要指导意见。他从图书的定位、内容选材、作者队伍建设和运作流程等方面都给予了全面和具体的指导，并提出了“六个特点”和“四性”的具体要求。对每个分册的内容重点提出了具体的建议要求。

机械工业出版社还建立了完善的项目管理、编写组织、出版规范和网络支撑四个方面的工作体系来保证图书质量。各组编单位投入了大量的精力组织行业权威专家规划内容结构、研讨内容特色；参与图书编写的主创人员也不计报酬，自觉自愿地把自己的聪明才智和研究成果奉献给社会，奉献给国家。他们都担负着繁重的科研、教学、行业管理或生产任务，为了使此书能够早日与大家见面，他们不辞辛苦、加班加点。因为他们都有一个共同心愿——帮助企业快速成长，使中国由大变强。

在此，衷心地感谢为此项工作付出大量心血的组编单位、各位专家、各位撰稿人、编辑出版及工作人员！

尽管我们做了大量工作，付出了巨大努力，但仍难免有疏漏或错误之处，敬请读者批评指正！

《中国战略性新兴产业研究与发展》编辑部

2017 年 6 月

目录 CONTENTS

序言

前言

编写说明

第 1 章　内燃机产业的战略地位 …… 1

1.1　内燃机工业是重要的基础产业 …… 2

1.1.1　内燃机工业的发展历史 …… 2

1.1.2　内燃机在各行各业的作用 …… 4

1.1.3　内燃机产业的现状 …… 6

1.2　为国家重大装备和重点工程发挥重要的支撑作用 …… 12

1.2.1　内燃机工业对汽车产业的支撑作用 …… 13

1.2.2　内燃机工业对工农业装备的支撑作用 …… 15

1.2.3　内燃机工业对船舶装备的支撑作用 …… 16

1.2.4　内燃机工业对发电装备的支撑作用 …… 19

1.2.5　内燃机工业对机车装备的支撑作用 …… 20

1.2.6　内燃机工业对国防装备的支撑作用 …… 20

1.3　内燃机在节能减排中的作用 …… 22

1.3.1　我国的节能减排战略 …… 22

1.3.2　内燃机的能源消耗与污染物排放 …… 26

1.3.3　高效内燃机将为节能减排作出重要贡献 …… 27

第 2 章　基础与现状 …… 29

2.1　我国内燃机产业与战略性新兴产业的关系 …… 30

2.1.1　内燃机产业对战略性新兴产业的支撑作用 …… 30

2.1.2　战略性新兴产业对内燃机产业的提升改造作用 …… 32

2.2　我国内燃机产业发展概况 …… 33

2.2.1　我国内燃机产业的特点 …… 34

2.2.2 产业结构概况 …… 35
2.2.3 产业地域分布情况 …… 42
2.2.4 资本或所有制结构情况 …… 43
2.2.5 对外交流合作概况 …… 44
2.2.6 行业发展环境概况 …… 45
2.3 政策与法规 …… 48
2.3.1 主要政策 …… 48
2.3.2 主要法规 …… 52
2.4 标准体系和标准化 …… 57
2.4.1 汽车发动机领域技术标准体系现状 …… 59
2.4.2 优化标准体系 …… 60

第 3 章 国际先进水平及发展趋势 …… 63
3.1 主要先进国家内燃机产业的发展历程和特点 …… 64
3.2 主要先进国家内燃机产业的技术水平和规模 …… 65
3.2.1 主要先进国家内燃机产业概况 …… 65
3.2.2 主要先进国家内燃机产品技术水平 …… 80
3.3 世界内燃机产业技术和产品发展趋势 …… 95
3.3.1 内燃机产业技术发展趋势 …… 95
3.3.2 内燃机产品和产业发展趋势 …… 104
3.4 跨国集团公司在我国投资发展概况 …… 132
3.4.1 跨国内燃机集团公司在我国投资发动机情况 …… 132
3.4.2 外资内燃机集团公司在我国投资特点 …… 135
3.5 国外内燃机企业的管理模式 …… 137
3.5.1 发达国家内燃机制造企业的基本特点 …… 137
3.5.2 发达国家内燃机制造企业的组织管理 …… 138
3.5.3 传统管理模式的缺陷 …… 141
3.5.4 危机中的变革 …… 141

第 4 章 差距和问题 …… 143
4.1 存在的主要问题 …… 144
4.1.1 规模优势不突出 …… 144

4.1.2 设计研发能力差距明显 …… 144
4.1.3 核心零部件缺失 …… 144
4.1.4 产业结构不完善 …… 145
4.1.5 测试技术与设备严重缺失 …… 145
4.1.6 新经济形势下的挑战 …… 145
4.1.7 政策支持力度不足 …… 145
4.2 应对挑战的措施 …… 145
4.3 产品与技术 …… 146
4.3.1 内燃机的智能电控技术 …… 146
4.3.2 船用内燃机关键技术 …… 147
4.3.3 后处理技术 …… 148
4.3.4 低摩擦技术 …… 148
4.4 核心零部件 …… 149
4.4.1 燃油喷射系统 …… 149
4.4.2 增压器 …… 151
4.4.3 滤清器 …… 152
4.4.4 后处理器 …… 154
4.4.5 水泵、机油泵 …… 158
4.5 制造工艺与装备 …… 159
4.5.1 铸造 …… 159
4.5.2 机械加工 …… 161
4.5.3 装配试验 …… 163
4.6 政策与法规 …… 165
4.6.1 欧洲 …… 165
4.6.2 美国 …… 168
4.6.3 日本 …… 172
4.6.4 其他国家或地区 …… 175
4.6.5 中国 …… 176

第 5 章 目标 …… 181
5.1 指导思想 …… 182
5.2 发展战略及目标 …… 183

5.2.1 发展战略 …… 183
5.2.2 发展目标 …… 183
5.3 关键技术重点发展方向 …… 184
5.3.1 内燃机控制技术 …… 184
5.3.2 内燃机增压系统应用技术 …… 185
5.3.3 高效内燃机排气后处理技术 …… 186
5.3.4 替代燃料高效应用技术 …… 187
5.3.5 零部件集成模块化应用 …… 188
5.3.6 内燃机低摩擦技术应用 …… 190
5.3.7 内燃机用测试技术及设备开发 …… 190
5.3.8 车用混合动力内燃机应用技术 …… 191
5.3.9 冷却润滑系统模块化集成技术应用 …… 192
5.3.10 内燃机热力学设计与管理应用技术 …… 193
5.3.11 内燃机再制造技术 …… 194
5.3.12 高压燃油喷射技术 …… 195
5.3.13 船舶发动机控制技术 …… 196
5.3.14 非道路移动机械用柴油机 …… 197
5.4 产业结构调整目标 …… 197
5.4.1 产业结构调整情况 …… 198
5.4.2 产业结构调整的挑战 …… 199
5.4.3 目标 …… 201
5.5 产业转型升级目标 …… 203
5.5.1 基本要素 …… 203
5.5.2 保障条件 …… 204
5.5.3 发展途径 …… 204
5.6 产品目标 …… 205
5.7 配套目标 …… 209
5.8 市场服务目标 …… 212
5.8.1 市场服务的概念 …… 212
5.8.2 市场服务现状 …… 213
5.8.3 内燃机市场服务差距 …… 214
5.8.4 内燃机市场服务目标 …… 215

第 6 章　创新体系建设 …… 217
6.1　产业研发基地建设 …… 218
6.1.1　创新平台概述 …… 218
6.1.2　基础研究平台 …… 218
6.1.3　零部件研发平台 …… 222
6.1.4　工程技术中心体系 …… 224
6.1.5　整机研发平台 …… 228
6.1.6　协同创新平台 …… 229
6.1.7　创新平台的总体运行状况和建议 …… 230
6.2　行业人才培养 …… 232
6.2.1　发展历程 …… 232
6.2.2　人才培养现状 …… 233
6.2.3　新要求及挑战 …… 238
6.3　机制与制度 …… 239
6.3.1　强化企业技术创新主体地位，促进科技与经济紧密结合 …… 239
6.3.2　发挥行业研究院所的作用 …… 241
6.3.3　全面推进和完善创新体系建设 …… 242
6.3.4　组建内燃机协同创新中心 …… 243
6.3.5　建立行业知识产权联盟，开展协同运用试点建设 …… 243
参考文献 …… 245

第 7 章　推动内燃机产业可持续发展 …… 247
7.1　绿色、智能制造基础技术 …… 248
7.1.1　绿色制造基础技术 …… 248
7.1.2　智能制造基础技术 …… 252
7.2　关键设计技术 …… 258
7.3　关键制造工艺技术与装备 …… 260
7.3.1　铸造 …… 260
7.3.2　机械加工 …… 262
7.3.3　装配试验 …… 263

7.3.4 在线测量与信息化技术应用 …… 266
7.4 关键零部件及材料 …… 267
7.4.1 国内缸体、缸盖现状及发展趋势 …… 267
7.4.2 内燃机曲轴 …… 268
7.4.3 内燃机凸轮轴 …… 268
7.4.4 内燃机排气歧管 …… 269
7.5 高效密封、低摩擦技术 …… 269
7.5.1 先进非金属材料 …… 269
7.5.2 内燃机先进密封材料 …… 273
7.5.3 低摩擦技术 …… 274
7.6 测试设备和测试技术 …… 277
7.6.1 测试设备的研发与生产现状 …… 277
7.6.2 测试技术 …… 280
7.7 燃料及应用 …… 284
7.7.1 石油类液体燃料的应用现状及其研究 …… 284
7.7.2 气体燃料的应用和研究 …… 287
7.7.3 结束语 …… 295
7.8 内燃机再制造 …… 295
7.8.1 内燃机再制造产业现状 …… 295
7.8.2 发展重点 …… 300
参考文献 …… 302

第 8 章 产业发展政策性措施建议 …… 303
8.1 提高创新能力 …… 304
8.1.1 提高法规创新能力 …… 304
8.1.2 提高体系创新能力 …… 305
8.1.3 提高内燃机动力系统的设计与制造服务创新 …… 305
8.1.4 提高零部件创新能力 …… 306
8.1.5 发挥行业协会的创新引导作用 …… 307
8.2 加快结构调整 …… 310
8.2.1 完善产业发展政策 …… 310
8.2.2 领跑者计划与引领示范作用 …… 311

8.3 推动产业升级 …… 313
8.3.1 实施“一带一路”战略 …… 314
8.3.2 内燃机工业信息化的培育 …… 314
8.3.3 内燃机节能减排基础能力建设 …… 314
8.3.4 创新能力增长点的培育 …… 315
8.3.5 自主品牌培育 …… 316
8.3.6 内燃机零部件支撑体系建设 …… 316
8.3.7 产品可靠性及质量保证体系建设 …… 316
8.3.8 完善和健全标准体系 …… 317
8.3.9 内燃机现代服务业的培育 …… 317
8.3.10 强化监督管理 …… 317
8.4 行业品牌建设 …… 317
8.4.1 强化品牌建设 …… 317
8.4.2 行业协会的作用 …… 318
8.4.3 职能部门的作用 …… 319
8.5 优化企业管理 …… 321
8.5.1 现代内燃机企业的现状特点 …… 321
8.5.2 内燃机行业的管理现状 …… 322
8.5.3 新形势下对内燃机企业运营管理的挑战 …… 323
8.5.4 优化企业运营管理的建议 …… 324

第 1 章

内燃机产业的战略地位

内燃机工业是我国重要的基础产业。内燃机广泛用作汽车、摩托车、工程与农业机械、船舶、铁道内燃机车、内燃发电设备、国防装备、地质和石油钻机、旅游运动器械、园林机械和各种通用机械以及可再生能源高比例接入局域电网调节机组的主导配套动力；内燃机是我国城市和乡镇、机场和港口、公路和铁道、工地和农田、矿区和油井、江河和湖海、高山和边疆不可或缺的动力机械；内燃机在我国交通运输基础设施建设、机场和港口建设、农业现代化、国防现代化以及促进经济发展、提高城乡居民生活水平等方面发挥着重要作用。

内燃机工业是我国石油消耗的最大主体产业。2014 年消耗商品燃油超过 2.9 亿 t，按重量计为我国全年石油消耗总量的 60% 以上；排出 $CO_2$9.14 亿 t，占我国全年 CO_2 排放总量的 13%。开展内燃机节能减排工作，提高内燃机效率、减少污染物排放是我国实施节能减排发展战略的重要举措，是降低我国石油对外依存度、保护环境的必要和有效途径。

内燃机工业是战略性新兴产业，是以重大技术突破和重大发展需求为基础，跨学科、知识技术密集、成长潜力大、综合效益好的产业。是引导未来经济社会发展的重要力量，对推进我国现代化建设具有重要战略意义。

1.1 内燃机工业是重要的基础产业

1.1.1 内燃机工业的发展历史

内燃机是一种动力机械，它是通过使燃料在机器内部燃烧，并将其放出的热能直接转换为动力的热力发动机。根据所用燃料可分为汽油机、柴油机、压缩 / 液化天然气发动机（CNG/LNG）、液化石油气发动机（LPG）、乙醇发动机等，另有双燃料发动机、生物燃料发动机和灵活燃料发动机等。1876 年德国工程师奥托发明了四冲程循环点燃式发动机，即进气、压缩、膨胀与排气。这种发动机的热效率提高到了 14%，而质量则减少了近 70%。虽然当时用的燃料是煤气，但它已经奠定了点燃式发动机的工作方式，即今天汽油机和天然气发动机所采用的奥托循环。

随着中东石油的开发，能量密度更高的石油燃料引起人们的重视。1883 年德国工程师戴姆勒创制成功第一台立式汽油机，它的特点是轻型和高速。当时其

他内燃机的转速不超过 200r/min，它却一跃而达到 800r/min，特别符合交通运输机械的要求。1885—1886 年，汽油机作为汽车动力运行成功，奠定了汽车及汽车工业发展的基础。而汽车的发展又促进了汽油机的改进和提高。以汽油机为代表的点燃式内燃机是迄今为止大批量生产的最紧凑的动力机械，被广泛地用于汽车、摩托车、小型船舶、小型机械上。

1897 年，德国工程师狄塞尔发明了压燃式内燃机，采用煤粉和植物油等着火点低的燃料，在接近压缩终了时将其喷入缸内，并与缸内的高温空气形成混合气着火和燃烧。由于这种燃烧方式可以采用较高的压缩比并具有较高的膨胀比，热效率比当时其他的内燃机高一倍。后期燃料改为着火性更好的柴油，至此，汽油机和柴油机均已出现。

内燃机的出现是第二次工业革命的一个主要标志之一。由于内燃机的发明，人类得以极大地提升了自身的能力并摆脱了对自然界的依赖。由于内燃机的发明，为海陆空运载工具和移动式工作机器提供了新的动力源，为分布式电网提供了新的选择。有了内燃机，运载不再依靠人力自身和畜力，航运不再依靠风力和人力，基础设施建设不再是人拉肩扛，部队行动不再是依靠两条腿或牲畜。经过一百多年的发展，内燃机结构和性能不断优化和提高，功率范围越来越广，升功率越来越大，热效率不断提高，燃料也从最初的煤粉、植物油等逐步发展为可以燃烧的汽油、柴油、天然气、甲醇、乙醇、生物柴油、二甲醚等多种燃料。

我国第一台内燃机于 1908 年在广州均和安机器厂诞生，至今已有 100 多年的历史。新中国成立前我国的内燃机产业水平很低，没有形成完整的制造体系。新中国成立以后，在党和人民政府的领导下，我国内燃机产业得到了蓬勃发展。从恢复、整顿、改造开始，组织建立了内燃机及其关键零部件的专业化协作生产配套体系，制定了内燃机系列型谱和技术政策，中国内燃机人克服种种艰难困苦，经过几十年的努力，使我国的内燃机产业取得了长足的进步。从小缸径到大缸径、从单缸到多缸、从汽油机到柴油机、从二冲程到四冲程、从低速到高速、从零部件到整机、从研发到生产制造和标准、质量、检测等各个方面，已经基本掌握了设计、研发具有国际先进水平的内燃机的技术、方法和流程，我国的内燃机产业已形成系列、品种、门类都完整、齐全的制造、生产和质量保证体系。内燃机产业已成为机械行业的重要组成部分，是国家重要的基础产业。内燃机已经成为汽车、摩托车、农业和园林机械、工程机械、船舶、铁道机车、中小型发电机组和国防建设等领域的主要配套动力，内燃机产业为推动我国国民经济发展和社会主

义现代化建设事业做出了重大的贡献。

1.1.2 内燃机在各行各业的作用

内燃机以优良的动力性、经济性和可靠性，满足了各种配套机械的需要，是各种配套机械产品的心脏，对各种配套主机的市场发展具有重大影响。随着科学技术的发展，现代内燃机融合了电子技术、信息技术、新型材料和精密制造等诸多高新技术，发展成为一种融合多学科技术的高新技术产品。现代高性能内燃机的热效率已超过 40%，超长行程二冲程柴油机的循环热效率可以达到 50% 以上，近年随着 CO_2 减排和油耗标准日趋严格，重型载货汽车柴油机的热效率也将达到 50%。内燃机的功率覆盖范围很宽，单机功率从 1kW 到 8×10^4kW 以上，其转速范围 70 ～ 19 000r/min。柴油机升功率已经达到 100 kW/L，汽油机升功率已经达到 200kW/L。

1. 内燃机在道路交通运输中的作用

一直以来，内燃机在我国交通运输业中扮演着非常重要的角色，为汽车、摩托车、大型运输车辆、内燃机车以及大型船舶等各种类型的交通工具提供动力。

2015 年年底，我国机动车保有量达 2.97 亿辆，其中汽车 1.72 亿辆。2015 年我国汽车产销分别完成 2 450.33 万辆和 2 459.76 万辆。内燃机行业为道路车辆提供了 2 500 万台发动机。

摩托车行驶和停车占用道路资源小，通过性能好，在特殊地形和边远地区的道路交通运输中发挥着重要的作用，2015 年，内燃机行业为摩托车提供了 2 500 万台发动机。

2. 内燃机在农业生产中的作用

我国农业装备产业快速发展，已经成为世界最大的农业装备生产和使用大国，内燃机配套的拖拉机、联合收割机、农用运输车等农业装备，产品数量远远超过其他国家。为农业灌溉、小型拖拉机（手扶及小四轮）和农用三轮运输车提供配套动力的主要是小型单缸柴油机；为农用运输车、大中型拖拉机、中小型联合收割机和农用工程机械提供动力配套的主要是小型多缸柴油机。2014 年配套拖拉机、收割机等农用机械领域的拖拉机、自走式收获机械柴油机全年销量 750.21 万台，其中单缸柴油机约 500 万台。

农业机械中使用的内燃机主要以柴油为燃料。柴油机的低速转矩大、可靠性高，在非道路移动式农业机械装备上具备优良综合使用性能。随着经济的发展，小型汽油机由于结构紧凑、体积小、升功率高、噪声低、使用灵活等优势，越来

越多地被应用到小型农业机械上。

3. 内燃机在工程建设中的作用

在我国基础设施建设中，以推土机、挖掘机、装载机为代表的土方作业机械，压路机、摊铺机、铣刨机为代表的道路建设机械，叉车和轮式起重机为代表的举升机械，是我国基础设施建设、港口建设、机场建设中自走式移动机械的主要装备，内燃机作为配套动力，起到了举足轻重的作用。2014 年工程机械用内燃机销量约 65 万台。

4. 船舶用柴油机

柴油机的热效率高、经济性好、起动容易、功率范围宽，非常适合在各类船舶上运用。柴油机问世后很快就被用作船舶的推进动力。直至今日，船用柴油机已在远洋运输、捕捞作业、内河航运以及水面作业机械上被广泛作为主机和辅机使用，也是国防装备舰船的选配动力。船舶用柴油机根据船舶用途分为低、中、高速柴油机。一般远洋运输等大型船舶选用低速柴油机，远洋捕捞和水面作业选择中速柴油机，内河航运和近海捕捞选择高速柴油机。2014 年，全国造船完工 3 905 万载重吨，我国船用柴油机产品已形成多种类规格齐全的产品系列，最大功率柴油机达到 80 000kW，缸径可达 980mm。

5. 内燃机在工业生产中的作用

在工业生产各领域中，以内燃机为动力的发电机组、空气压缩工作站、地质钻探机械、石油开采机械等装置发挥着至关重要的作用。

内燃发电机组是机场、大型公共设施等备用应急电站；是通信基站、核电站等关键设施的储备电站；是医院、银行等的应急电站，在未来发展中的分布式电网建设中，还将担负着调峰的重要作用。内燃发电机组还可以使用包括柴油、汽油、可燃气体（包括煤气、瓦斯气、天然气、液化石油气和沼气等）、双燃料（包括气体、液体）等多种燃料。随着工业生产中智能控制程度越来越高，内燃发电机组作为备用电源需求越来越大。此外，内燃机还被广泛应用于石油专用工程（机械）装备：如自行式修井机、压裂车、井架安装车、物探钻井车以及陆路钻井动力、海洋钻井动力以及输气管线加压站等。2014 年发电机组用内燃机全年销量 300.24 万台。

多用途小型通用内燃机在园林机械、家用小型发电机组、无人飞机动力、药物喷洒器械、抢险救灾的液压破拆工具动力、家用扫雪车、航模动力等等方面得到广泛应用。2014 年的销量超过 2 000 万台。

内燃机是国防装备的主导动力，在运输装备、防卫装备和武器装备中被广泛使用。作为主要动力来源的内燃机，其性能和可靠性直接决定了军事装备的性能。随着国防工业装备机动性、智能响应性的不断提升，推动内燃机产品在确保使用可靠性的同时，技术性能也随之提升。

内燃机工业从其诞生以来，经过一个多世纪的发展，已形成了完整的产业体系，对现代工业经济建设和国防安全形成了不可或缺的产业地位，发挥了举足轻重的作用。内燃机工业的持续发展，必将对我国经济建设和人民生活水平提高发挥更大的作用。

1.1.3 内燃机产业的现状

随着科学技术的发展和法规的推动，现代内燃机融合了电子、信息、环境、能源、石油化工、新型材料和智能制造等诸多高新技术，已成为融合多学科、跨领域的高新技术产品。

我国内燃机产业经历了从无到有，从弱到强的发展过程，经过 100 余年的艰苦创业，拼搏奋斗后，已经成长为当之无愧的内燃机制造大国。根据国家统计局统计数据，截至 2014 年年底，我国内燃机产品社会总保有量达 4 亿台，总产值为 4 500 亿元，内燃机产品总产量达 8 000 万台，总功率 20 亿 kW。多种内燃机产品产量位居世界第一，其中车用内燃机占全球产量的 31%，农机用内燃机占全球产量的 47%，工程用内燃机占全球产量的 40%，摩托车用内燃机占全球产量的 31%，小型通用型内燃机产量占全球产量的 40%。

1. 内燃机企业

我国内燃机行业目前有 3 000 余家制造企业，全行业从业人员近 40 万人。近年来，我国内燃机行业坚持走新型工业化道路，不断深化改革，发展步伐明显加快，经济效益大大提高，企业管理水平和自主创新能力持续提高，经济实力、经营能力和市场竞争力日益增强，在我国现代化建设中发挥着重要的作用。根据对行业 84 家重点企业调研，目前拥有国家级技术中心的企业约有 24.62%，省级技术中心的企业达 63.08%。拥有省级技术中心的企业中，28.57% 的企业拥有国家级驰名商标，57.14% 拥有省级驰名商标；拥有市级技术中心的企业中，20% 拥有国家级驰名商标，30% 拥有省级驰名商标，40% 拥有市级驰名商标；企业拥有技术中心的等级与其品牌的影响力有一定的相关性，技术中心级别越高，技术投入越多，品牌影响力越大。

我国内燃机企业按照生产产品可以大体分为整机企业和配套零部件企业。其

中整机生产企业又可以分为：单缸柴油机企业、小缸径多缸柴油机企业、通用小型汽油机企业、中等缸径多缸柴油机企业、多缸汽油机企业和大功率柴油机企业。配套零部件企业主要可以分为：燃油系统企业、内燃机换热器企业、冷却水泵机油泵企业、活塞活塞销企业、曲轴连杆及高强度螺栓企业和排放后处理企业。

单缸柴油机主要服务于“三农”，用于小型拖拉机、农机具、道路和非道路、移动或相对固定机械配套的动力源。目前，我国单缸柴油机主要生产企业有50多家，而持有《生产许可证》的企业则超过了百家。单缸柴油机生产企业中，2014年销量排名在前4位的企业依次是常柴股份有限公司（常柴）、江苏常发实业集团有限公司（常发）、江苏江淮动力股份有限公司（江动）及安徽全柴集团股份有限公司（全柴）。这4家企业的产销量均超过50万台，有的甚至超过100万台，2014年共销售约515万台。多年来，单缸柴油机企业存在老产品多、产品技术含量不高、企业多小而散、产品利润率低、投入少、技术与管理人才难招与难留、优质品牌少、创新缺乏与竞争力不强的问题。

小缸径多缸柴油机是指功率不大于100kW，缸数不多于4缸及缸径不大于100mm的柴油机。产品主要用于轻型汽车、低速汽车、微型汽车、轿车和皮卡、中大型拖拉机、中小型联合收割机、中小型工程机械、内河湖泊和沿海船舶，以及发电机、水泵、空压机等道路、非道路和固定机组的配套。目前，国内小缸径多缸柴油机行业主要生产企业有37家。年销量在10万台以上的企业有8家，其中年销量在30万台的企业有2家，分别是玉柴机器股份有限公司（玉柴）和全柴动力股份有限公司（全柴）；年销量在20万台的企业有昆明云内动力股份有限公司（云内）、浙江新柴股份有限公司（新柴）、江铃汽车股份有限公司（江铃）、一汽解放汽车有限公司无锡柴油机厂（锡柴），其他产量较多的企业有山东华源莱动内燃机有限公司（莱动）、常柴股份有限公司、潍柴动力扬州柴油机有限责任公司（扬柴）、一拖（洛阳）柴油机有限公司（洛拖）。小缸径多缸柴油机产品经过多年的技术积累和市场检验，已有部分产品得到国内市场的认可，甚至在燃油消耗指标、排放指标等方面已经接近国外先进水平。但是，在零部件材料、产品热处理、尺寸精度、可靠性，以及研发能力、技术储备等方面还存在很大差距。在整个行业处于整机价格低、盈利小、市场不稳定的情况下，企业很难有更多资金进行产品外观“时尚化”、结构优化、体积紧凑化、整机轻量化及性能先进的高端产品的攻关，以进一步缩小与国外同类产品的差距。

通用小型汽油机主要作为农林植保机械、小型农机具、园林机械、发电机组、

建筑机械、舷外机械等的配套动力。由于通用小型汽油机体积小、重量轻、价格便宜、使用方便,所以在各种机具配套中占有重要位置。特别是在背负式机械之中,通用小型汽油机更是唯一的配套动力。通用小型汽油机一般为单缸机，少数为双缸或四缸机。通用小型汽油机外向度高，出口与内销发展不平衡。自 2003 年起，小汽油机行业出口所占的比例一直在 80% 以上，并且以产品贴牌出口为主，市场、品牌、售后服务均不掌握在自己手中。小型汽油机企业以中小企业为主，自主开发能力较弱，资金也不充裕。目前我国生产通用小型汽油机的企业主要有：隆鑫通用动力股份有限公司、山东华盛中天机械集团股份有限公司、江苏林海动力机械集团公司等企业。

中等缸径多缸柴油机的缸径在 100 ～ 160mm，气缸数量主要为 2 ～ 6 缸。中等缸径多缸柴油机主要为汽车、工程机械、拖拉机、联合收割机、船舶和发电机组等配套，其配套面最广，使用工况最复杂、对产品质量要求最高。我国目前中等缸径多缸柴油机的生产企业有 40 余家。2013 年我国中等缸径多缸柴油机的产销量分别为 234 万台，256.6 万台。其中年产销量在 50 万台以上的企业有潍柴集团、玉柴集团；年产销量在 30 万～ 50 万台之间的企业有一汽解放汽车有限公司无锡柴油机厂；年产销量在 10 万台左右的企业有东风朝柴动力有限公司、潍柴动力扬州柴油机有限责任公司、上海柴油机股份有限公司（上柴）、道依茨一汽（大连）柴油机有限公司（道依茨）、洛阳一拖集团。

多缸汽油机主要应用于汽车，经过多年的发展，汽车工业已经成为我国国民经济的支柱产业。近年来,我国多缸汽油机行业进入平稳发展阶段,调整产品结构、鼓励和发展小排量、节能环保汽车成为我国汽车工业的主要发展方向。随着经济的发展和人民生活水平的提高，汽车的普及率越来越高。2015 年 2 月 26 日国家统计局发布了《2014 年国民经济和社会发展统计公报》，2014 年年末全国民用汽车保有量达到 15 447 万辆（包括三轮汽车和低速货车 972 万辆），其中私人汽车保有量 12 584 万辆，民用轿车保有量 8 307 万辆，其中私人轿车 7 590 万辆。扣除三轮汽车和低速货车，2014 年年末全国民用汽车保有量达到 14 475 万辆，千人保有量首次超过百辆，达到 105.83 辆 / 千人。国内多缸汽油发动机主要由汽车企业自行配套生产。

大功率柴油机具有热效率高的显著优点，主要应用于船舶机械和电力工业等领域。近年来，我国大功率柴油机行业快速发展，大、中型船用柴油机扩产能项目较多。尽管中国船用低速柴油机企业数量和生产能力有了显著提升，但是由于

企业整体水平不高、核心二轮配套能力不足，导致近一半的主机从国外进口。根据《2011 年典型船舶配套设备本土化情况调查报告》数据，2011 年我国完工典型船舶主机的本土化装船率约为 50%。我国大功率柴油机的生产企业主要是中船集团和中船重工集团下的沪东重机股份有限公司、上海中船三井造船柴油机有限公司、大连船用柴油机有限公司、宜昌船舶柴油机有限公司等企业。由于产品系列完善，能较为全面地满足两大集团 的造船需要。

燃油系统为内燃机提供燃料，是内燃机主要系统。我国燃油系统行业产品大部分与汽车配套，小部分与工程机械、农业机械、船舶等非道路用柴油机配套，电控柴油喷射系统产品为满足国Ⅳ甚至国Ⅴ车用柴油机配套。我国燃油系统的行业发展是随着国民经济的快速增长而增长，是由载货运输和工程建设等领域对柴油机的强劲需求所带动，其产销量的多与少主要取决于汽车（特别是以柴油机为动力的商用车）的生产与发展。2013 年全行业主要产品的销售收入为 132.7 亿元。行业销售收入列前六位的企业分别为无锡威孚高科技集团股份有限公司（无锡威孚）、山东鑫亚工业股份有限公司（山东鑫亚）、山东龙口龙泵燃油喷射有限公司（龙口龙泵）、上海电装燃油喷射有限公司（上海电装）、南岳电控（衡阳）工业技术有限公司（南岳电控）、中国重汽重庆燃油喷射系统公司（重油）。

随着内燃机工业的发展，除了燃油系统等关键部件有了快速进步和发展之外，其他的零部件等配套产业也得到快速发展，不仅满足了国内内燃机的整机配套要求，而且有些部件还出口国外。如可以满足强化内燃机性能的各类冷却器，包括润滑油、增压进气、废气再循环气体等换热器。还有可以按内燃机不同工况要求智能工作的变流量冷却水泵和机油泵等等。活塞、连杆、缸套、曲轴、机体、缸盖等部件完全实现国内自主设计和生产，部分产品的性能和质量水平达到世界领先。

2. 研究院所和科研工作

从 1998 年开始，国家实施“科教兴国”战略，建设创新体系，加快科技成果产业化。新阶段深化科技体制改革的目标是调整优化科技结构，整合科技资源，建立和完善中国特色国家创新体系。在深化科技体制改革方针政策的指引下，内燃机行业开展了自主开发和创新体系的探索和实践，已初步形成了内燃机技术创新体系，初步建立了应用基础研究平台、关键技术研究平台和新产品开发平台；在产品层面上包括了零部件研发平台、整机研发平台、协同创新平台等。

我国内燃机行业科研院所主要有：上海内燃机研究所、天津内燃机研究所、

洛阳拖拉机研究所、中国北方发动机研究所、大连机车研究所、中国船舶重工七一一研究所和无锡油泵油嘴研究所。各个企业分别建有企业技术研究中心，如中国第一汽车集团技术中心、东风汽车研究院、潍柴技术中心、玉柴研究院等等。内燃机行业通过科研院所逐步转制和各大企业的技术中心进行合并重组，研发力量的整合，发动机产品结构的调整，研发全新换代产品以满足“重、中、轻、轿、微”各类汽车、各种拖拉机、非道路以及船舶等配套动力需要。

目前，我国内燃机行业已经建有“内燃机燃烧学国家重点实验室”和“内燃机可靠性国家重点实验室”。依托内燃机整机、零部件生产企业和高等院校，机械工业联合会共批准建设了涉及内燃机关键技术领域的工程研究中心和重点实验室 15 个，包括工程研究中心 13 个，重点（工程）实验室 2 个，其中 8 家已经通过验收并挂牌运行。无论是国家级技术中心还是省级、市级技术中心，拥有数量都在不断地增加，其中以省级技术中心的增加尤为迅速，这些工程中心和重点实验室的建设为内燃机关键零部件和核心技术的研发奠定了基础。

从事基础研究、前沿技术研究的科研机构是我国科技创新体系的重要组成部分。新中国建立以来，我国有多所高等院校的内燃机学科开展了大量的基础研究及前沿技术研究，为我国内燃机工业的科技进步培养了人才。为了进一步发挥高校在凝聚和培养优秀人才、多学科交叉创新和开展国际学术交流方面的优势，也为了稳定基础研究队伍和提高科技创新能力，在高校建立了一些国家重点实验室。目前，依托于高校建立的内燃机国家级重点实验室分别是，天津大学“内燃机燃烧学国家重点实验室”和清华大学“汽车安全与节能国家重点实验室”，另外一些有条件的高校，还建有一些隶属于省部委的重点实验室。

3. 人才培养与高等院校

通过对企业员工学历、人才培养及引进、企业技术中心数量及级别、企业拥有专利的情况等研究，内燃机企业对人才、对技术、对科研的研究重视程度越来越高。目前整体学历水平仍然偏低，其中，中专及以下的占 56.57%，本科及以上的占 20.22%。员工学历构成比例与企业性质、是否有技术中心、企业规模等都有直接的关系。内燃机行业人员平均学历构成见图 1-1。行业龙头企业的人员学历构成见图 1-2。

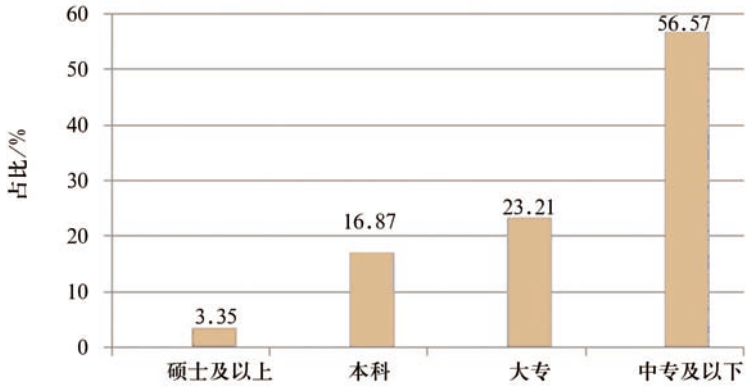


图 1-1　内燃机行业人员平均学历构成

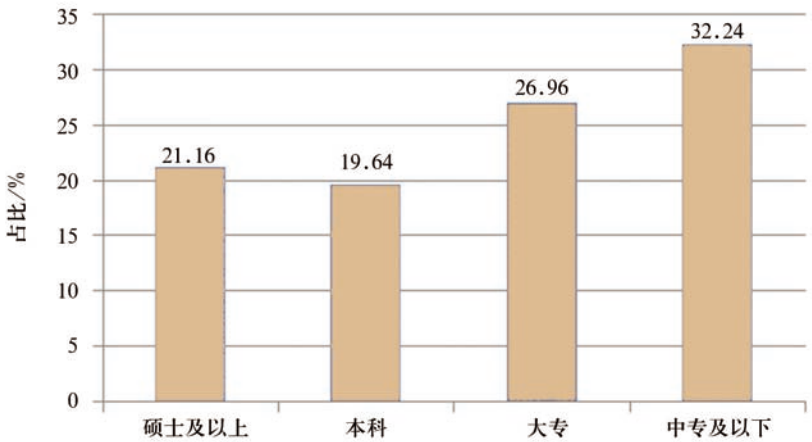


图 1-2　行业龙头企业的人员学历构成

内燃机企业参与国家“千人计划”、特聘专家、研究生工作站、委外脱产计划、海外高层人才、高校联合培养等的企业有 7 家。参与千人计划、产学研合作的有 2 家，参与博士后科研工作站、产学研合作的企业有 13 家。

我国目前进行内燃机专业人才培养的高等院校共有 43 个，研究院所 3 个。根据国务院学位办 1997 年的学科分类规定，内燃机专业属于“动力工程及工程热物理”一级学科中的“动力机械及工程”二级学科。国家为了促进高校教学和科研水平的提高，相继在一些高校确定了国家重点学科和各级的重点实验室，以增强为国民经济服务的能力。

动力工程及工程热物理一级学科为国家重点学科的学校有：清华大学、哈尔滨工业大学、上海交通大学、西安交通大学、浙江大学和华中科技大学。动力机

械及工程二级学科为国家重点学科的学校有：清华大学、上海交通大学、西安交通大学、天津大学、哈尔滨工业大学、北京理工大学。轮机工程二级学科为国家重点学科的学校有：哈尔滨工程大学、武汉理工大学、上海交通大学、大连海事大学和海军工程大学。

各高校在科研工作中很注意与企业及科研单位密切结合，使科研成果直接为发展国民经济服务。

1.2 为国家重大装备和重点工程发挥重要的支撑作用

“十一五”期间，内燃机作为基础产业，为响应国家“装备制造业调整和振兴规划”“汽车产业调整和振兴规划”“船舶工业调整和振兴规划”，面对国内外两个市场竞争与挑战，抓住新的发展机遇，加快调整产业结构和产品结构，提高行业整体素质、经济效益和技术创新能力。全行业以国家出台实施的节能减排各类法规为目标，结合国外先进技术自主研制开发了一大批为汽车、摩托车、工程机械、农业机械、船舶、铁道内燃机车、内燃发电设备、石油钻机和国防装备等配套的新一代先进发动机产品，为汽车工业和船舶工业振兴和发展发挥了重要的支撑作用。

“十二五”期间，国务院颁布了国发〔2012〕28 号《“十二五”国家战略性新兴产业发展规划》《国家重大技术装备研制和重大产业技术开发专项规划》，明确指出了交通运输、工业、农业、船舶、电力等行业重点工程和重大装备配套内燃机的国内制造计划。主要包括：高效清洁发电重点工程，实现二代改进型核电机组中应急柴油发电机组的国内制造；高速铁路重点工程，实现高速动车组、大功率交流传动电力 / 内燃机车、重载货车、大型养护机械等装备的国内制造；海洋工程设备，实现大功率柴油机及其他船用关键配套设备的国内制造；大型环保及资源综合利用设备，实现多种燃料发动机的国内制造；在航空产品中，实现活塞发动机的国内制造；在农业重点工程上，大力发展节能环保大功率拖拉机及配套农机具、农产品精深加工成套设备、灌溉和排涝设备等所需的清洁内燃机；以及以特大型履带式推土机、大型装载机、大型隧道全断面掘进机等为重点，发展大型、新型施工机械所需的内燃机。我国内燃机工业顺势而为，产业结构进一步调整，产品技术水平有了较大幅度的提升。截至 2014 年年底，我国内燃机产品社会总保有量 4 亿台，总产值 4 500 亿元，完成了年平均增长 8% ～ 10% 的目标要求；内燃机产品总产量 8 000 万台，总功率 20 亿 kW，实现了年平均增长 6% ～ 10% 的目标要求；同时全行业突破了经济效益年均增长 10% ～ 15% 的预

期目标。为交通运输、工业、农业、船舶、电力等行业重点工程和重大装备提供了重要支撑。

在新的经济增长模式下，国家提出了“新丝绸之路经济带”和“21 世纪海上丝绸之路”的“一带一路”战略构想，铁路网、公路网、油气管道、跨界桥梁、输电线路、光缆传输系统等基础设施建设是“一带一路”互联互通的基础，内燃机是“一带一路”基础设施建设的主要动力。国务院颁布的《中国制造 2025》（国发〔2015〕28 号），提出了 10 大重点突破领域中，航空航天装备、海洋工程装备及高技术船舶、先进轨道交通装备、节能与新能源汽车、电力装备、农业机械装备等 6 大领域对内燃机工业提出了新的需求，也给内燃机工业的发展提供了创新发展的机遇。

1.2.1 内燃机工业对汽车产业的支撑作用

汽车工业已成为我国国民经济的支柱产业，具有产业关联度大、资金积累能力强和就业人口多的特点。随着汽车工业的进一步快速发展，汽车工业对国民经济发展的贡献正越来越突出。2014 年年底，我国汽车保有量达到 1.54 亿辆，已经成为世界最大的汽车生产国和第一大新车市场，预计到 2020 年我国汽车保有量将超过 2 亿辆。国家已将构建“汽车强国”作为我国汽车产业发展战略目标，提出了优化汽车产业结构，促进汽车产业持续、健康、高速发展的指导原则。

国家在《中国制造 2025》中明确提出大力发展节能与新能源汽车。在继续支持电动汽车、燃料电池汽车发展的同时，强调提升高效内燃机核心技术的产业化能力，形成自主创新体系，推动自主品牌，实现与国际先进水平接轨。2015 年，国家发展改革委《关于当前更好发挥交通运输支撑引领经济社会发展作用的意见》提出，将进一步开展“一带一路”交通走廊、京津冀协同发展交通一体化、长江经济带综合立体交通走廊、中西部（含东北）交通、新型城镇化等重大项目的建设，促进我国汽车产业的发展，推动我国内燃机工业的发展。

目前，商用车已实施国Ⅳ排放标准，轻型汽车也将于 2018 年全面实施国家环保部和国家质量监督检验检疫总局共同发布的 GB 18352.5—2013《轻型汽车污染物排放限值及测量方法（国Ⅴ）》。汽车排放标准的升级，必将对车用发动机带来新的机遇和挑战。

内燃机是实现全社会节约石油的基础和节能减排的重要环节，在我国建设“资源节约、环境友好型”社会的过程中占有举足轻重的地位。“十二五”期间，按照国家节能减排的总体要求，内燃机工业大力推进产品及其关键零部件开发，推

动先进节能技术应用及节能产品产业化，内燃机产品燃油消耗大幅下降，替代燃料应用有了一定基础。

我国内燃机产品与国际先进产品相比仍然具有巨大的差距，截至“十二五”末期，我国内燃机产品综合能效与国际先进水平相差 10% ～ 20%，车用内燃机燃油消耗率相差 8% ～ 10%，排放水平相差两个等级；内燃机产品节能共性关键技术缺失，关键零部件基础薄弱，制约内燃机高效低排的高压共轨燃油喷射系统、高效滤清器、先进增压系统、后处理装置、控制系统等核心技术和关键基础元器件受制于人的局面依然存在，这也为未来我国内燃机工业提供了新的发展机遇和挑战。

2013 年以来，我国车用发动机技术向节能、减排、轻量化、智能化、电子化方向发展。关键技术有所突破，如长安、吉利、奇瑞、力帆、比亚迪等自主品牌生产企业已开发应用可变气门（CVVT）、缸内直喷（GDI）、汽油机增压技术、共轨电喷柴油机等先进技术，为汽车工业的发展提供了合格的配套动力。

未来车用发动机将突破的关键技术主要包括：在车用汽油发动机方面，重点推广应用增压、缸内直喷技术、废气再循环（EGR）及汽油机颗粒捕集器（GPF），优化燃烧过程，提高整机热效率，推广轻量化技术；在柴油机方面，应用电控高压燃油喷射系统、高效增压中冷系统、废气再循环（EGR）及柴油机颗粒捕集器（DPF）。在轻型车用柴油机方面，加快电控高压燃油喷射、高效燃油滤清、高效增压、废气再循环（EGR）和颗粒捕集器（DPF）等技术的推广应用。在中重型商用车用柴油机方面，推广高效增压技术应用，降低转速和采用电控冷却润滑技术。

电控高压共轨燃油喷射技术是柴油机技术升级的关键部件。目前国内多家燃油系统企业均研发出了具有自主知识产权、满足各种形式国Ⅳ排放标准的高压共轨燃油喷射系统产品。如新风集团研发的高压共轨系统，稳定工作压力达到 2 000 ～ 2 200bar，高压油泵的供油效率≥ 80%，喷油器总成响应时间＜ 0.4ms，每循环可实现 5 ～ 6 次喷射，可靠性 MTBF ≥ 4 000h，匹配机型涵盖轻、中、重型柴油机，完全满足国Ⅳ及以上排放标准。一汽集团研发的高压共轨燃油喷射系统已批量应用到车用发动机中。

汽车后处理技术是实现国Ⅳ排放标准的重要措施。国内已有多家后处理企业掌握了自主知识产权的 SCR 催化剂及其制备技术，以选择性催化还原技术（SCR）为主净化 NOx，满足了国Ⅳ阶段重型柴油车排放标准，开展了 SCR 技术与柴油

车的匹配机车研究，开发了车载故障诊断技术，形成了完整的重型柴油机车后处理技术体系，实现了基于自主技术、国产原料的 SCR 后处理装备的规模化生产及其在国产重型柴油车上规模化应用，打破了国外企业对柴油车后处理市场的垄断。

先进内燃机制造是发展节能与新能源汽车的基础，内燃机产业对实现“汽车强国”的战略目标具有强大的支撑作用。

1.2.2 内燃机工业对工农业装备的支撑作用

工农业装备（主要包括工程机械装备和农业机械装备）是我国工业农业发展的基础，内燃机是工农业装备的核心动力，其动力性、经济性、排放性及起动性能直接决定着工程机械和农业机械的整机综合性能，对工程机械装备和农业机械装备具有重要支撑作用。

1. 工程机械

工程机械行业与国家重点建设工程密切相关。公路、铁路、机场、港口、管线输送等基础设施建设，十大水系改造、防洪工程、南水北调工程、农田水利工程等水利工程，以及实施西部大开发战略等无一不与内燃机工程机械的作用密切相关。特别是近年来工程机械产业发展突飞猛进，产业体系不断健全和完善，技术创新能力显著增强，国际地位和影响力明显提高。2013 年，我国工程机械行业总规模突破 4 000 亿元，我国也因此正式成为全球最大的工程机械市场。2014 全球工程机械制造商 50 强排行榜中，我国有 11 家企业上榜，入选数量居世界第一，其中徐工集团、中联重科、三一重工位列前 10 强。

我国工程机械产业的壮大，带动了内燃机行业的迅速发展。《非道路移动机械用柴油机排气污染物限制及测量方法（三、四阶段）》GB 20891—2014 标准的实施，对工程机械用内燃机提出了更高的要求和创新发展的机遇。在我国内燃机工业“十三五”发展规划中明确了非道路移动机械用柴油机发展的关键技术，主要采用增压及增压中冷技术、电控高压燃油喷射技术、废气再循环（EGR）技术等，鼓励采用后处理技术。对非道路小型点燃式发动机，全面开展发动机燃烧优化、催化转化等技术的产业化应用，电控燃油喷射技术应用及专用发动机自主研发和工程化应用研究。

广大企业加快推进满足新标准设备的上市推广准备和新一代使用清洁能源工程机械产品的研制和试验、推广工作，一批主要企业利用其研发优势，创新开发了包括轻量化在内的节能减排产品和绿色施工技术应用产品，为工程机械行业提

供了满足排放标准的内燃机产品，支持了工程机械装备的发展。

2．农业机械

农业机械制造行业是为农业生产提供技术装备的基础性产业，是现代装备制造业的重要组成部分。我国农业机械工业已形成了包含拖拉机、耕整种植机、收获机、林业机械、渔业机械等 11 个领域，生产 3 200 多种产品的完整工业体系。我国农业机械行业工业总产值年均保持 20% 以上的增长速度，是机械工业最具活力的行业之一。

低碳经济时代的来临，对环境保护和资源节约提出了更高的要求。先进适用、智能化、精准化、多功能、高效率的保护性耕作、复式作业、精细农业等农业装备已成为农业装备的发展趋势。未来五年是我国农业机械大发展的关键时期，预计农业机械总需求量将持续升高，新技术和产品开发速度将加快。

内燃机也是农业机械装备的“心脏”，支撑着高效、环保、节能型农业机械的发展。《国家中长期科学和技术发展规划纲要（2006—2020 年）》明确提出了大马力拖拉机和新型履带拖拉机配套柴油机的技术指标要求：柴油机的综合技术水平，其排放、振动、噪声、油耗等方面的指标，达到欧美成熟市场的准入要求。提高节能环保技术，使用电控高压燃油喷射系统，实现油耗指标达到国外先进水平，排放指标满足出口国的要求。

1.2.3　内燃机工业对船舶装备的支撑作用

船舶行业是国民经济的重要组成部分，更是国防工业的支柱产业之一。

近十余年以来，我国造船业蓬勃发展，跻身全球造船吨位第一的位置，在船型发展上取得了令人瞩目的成绩。超大型集装箱、大型矿砂船、VLCC（超大型油轮）、节能减排船型取得了很大的成功；LNG（液化天然气）船、VLGC（超大型全冷式液化石油气运输船）等高科技船取得突破。世界船舶与海洋工程产业加速向东亚转移，预示着世界船舶和海工配套设备制造中心加速向东亚转移。造船完工量占世界份额超过 40%，标志着未来世界一半左右的船舶配套市场需求在中国。

1．发动机是船舶关键配套设备

船用发动机是船舶关键配套设备之一，是船舶的“心脏”，在船舶建造总成本中占 10% ～ 15% 的比重。造船业的发展势必要求以船舶用内燃机制造业的发展作为支撑。

近年来，我国船舶工业进入了快速发展轨道，产业规模不断扩大，造船产量

快速增长。为船舶工业配套的内燃机需求稳步增长。按照我国新船完工量年均在4 000 万载重吨推算，按照不同的比例，年均对船用低速机的需求量是约 1 100 万马力（1 马力 =735.499W）或约 1 400 万马力（见表 1-1）。按照平均 1.8 万马力一台低速机估算，大约是 592 台和 755 台。据测算，中速机的年均需求量大约 6 400 台（包括做主机和发电机组的中速机），考虑海洋工程装备和有关方面的需求，大约年均需要 6 500 台以上。

表 1-1　2011—2020 年我国造船对低速柴油机的年均需求量预测

预期新船完工量 / 万载重吨	4 000	
造船产量（载重吨）与装机功率（马力）比例	3.0 ： 1	2.5 ： 1
装船主机总功率 / 万马力	1 333	1 600
低速机占主机总量的比例	80%	85%
预期低速机需求量 / 万马力	1 066	1 360

数据来源：《中国船舶配套产业发展报告（2011 年度）》，中国船舶工业经济研究中心，2011.12。

2．我国船用发动机产业发展现状

我国已形成了较大规模的船舶动力系统生产基地，分别是长三角造船基地，有沪东重机股份有限公司、上海中船三井造船柴油机有限公司、合肥熔安动力机械有限公司、江苏安泰动力机械有限公司、浙江洋普重机有限公司、中船设备有限公司、安庆中船柴油机有限公司、上海齐耀发动机有限公司、中高曼恩柴油机有限公司等主机厂；环渤海造船基地，有大连船柴、青岛船柴、潍柴、淄柴等主机厂；珠三角造船基地，有珠海玉柴、广柴、广州中船船柴等主机厂。上述基地是我国船用柴油机研发和制造的最主要力量。

近年来，我国船用柴油主机产业快速发展，船用柴油主机的产能成倍增长，为造船企业提供了相当数量的船舶动力装置。船用低速机产量从 2004 年的不足 150 万马力增加到 2011 年的近 770 万马力；在中速机领域，船用中速机企业由 5 家增加到 2010 年的 10 家，2010 年我国完工船用中速柴油机近 1 100 万马力，由于金融危机的影响，2013 年船用中速柴油机完工量回落到 11 913 台 /1 040 万马力；在高速机领域，2013 年我国完工船用高速柴油机 16 672 台 /495.2 万马力。2004-2013 年我国船用柴油机完工情况见图 1-3。

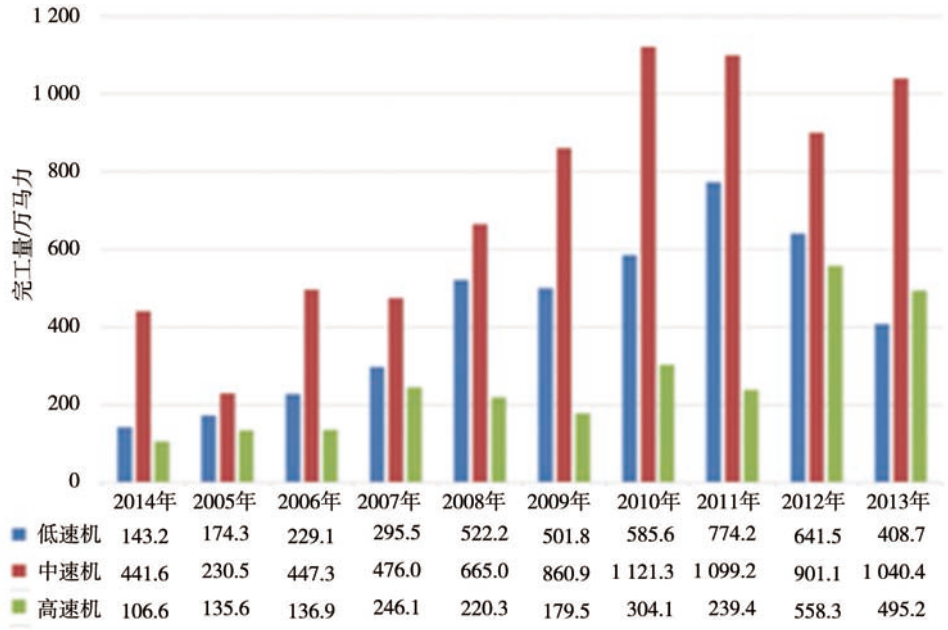


图 1-3　2004—2013 年我国船用柴油机完工情况

数据来源：《船用柴油机行业发展年度研究报告 2013—2014》，中国船舶重工集团公司 经济研究中心，2014 年。

国内中速机的发展较为迅速，无论是为内河及沿海船舶制造的主机，还是为出口和内销远洋船配套的船用发电机组，基本上能够满足国内市场的需求。

船舶用内燃机行业结合重大工程建设和重点行业需要，通过确立国产化依托工程，引进消化吸收国外先进技术，支持企业技术改造和技术攻关，增强了产业自主创新能力，实现了部分重大装备首台（套）的生产。目前，我国已经具备了一批具有一定国际竞争力的优势产品，例如船用柴油机，大型铸、锻件等，为船舶装备业提供了重要支撑。

在大型低速柴油机领域，我国船舶用内燃机企业通过对外合作和技术引进等方式，技术水平明显提高，如宜昌船舶柴油机有限公司完成了 6UEC43LSII 和 6S40ME-B 新机型技术开发，完成了 RTA48T-D、6S46MC-CMK8 和 6S50MC-CMK8 等机型更新换代的工作；沪东重机有限公司开发、制造了世界首台 6K80ME-C 智能型船舶用内燃机，完成了引进技术的国产化研究及智能化系统的安装、调试技术研究，掌握了关键制造技术及整机调试技术，该机主要适用于大型集装箱船；大型船用柴油机曲轴实现了国产化并开始出口，成为继日本、韩国

和捷克后世界上第四个船用曲轴生产国。

在中高速内燃机领域，实现国产化的中速机机型有：6DK-28（陕柴）、9L21/31（陕柴）、6L16/24（陕柴、中船设备、新中动力）、16PC2-6（陕柴）、L21/31（中船设备、新中动力）、L27/38（中船设备、新中动力）、6DKM-28（安庆船柴）、DK-20（陕柴）等。中船重工第七一一研究所成功研制了高压共轨6CS21/32等具有国际先进水平的自主品牌中高速机产品（单缸功率220kW,满足IMO Tier Ⅱ排放法规），并进行了CS21/32机型的系列化开发。

船舶发动机也面临着降低硫化物、碳化物、氮化物等排放污染物的要求，压舱水管理亦将受到更严密监控。我国船用内燃机生产企业正都在积极开发SCR、EGR等环保技术，为我国的船舶工业继续提供重要的支撑。

3．船用柴油机自主品牌的崛起

经过多年的发展，我国在船用柴油机总体设计、关键技术研发、系统集成、制造工艺等方面取得了一系列突破。近两年，成功研制了6CS21/32、CHD622V20等具有国际先进水准的自主品牌中高速机产品，填补了国内空白。这也标志我国从“技术引进”向“自主研制、自主品牌”转变。

河南柴油机重工有限责任公司和沪东重机股份有限公司针对不同市场需求，采用共轨、电控的先进技术，开发相应的产品，自主品牌的崛起，标示着我国船用柴油机产业将步入快速发展的快车道。

1.2.4　内燃机工业对发电装备的支撑作用

发电机组在国民经济中扮演着重要的作用，一方面可以用于船舶用电、石油开采、工程抢修、军事等移动电源，也在国家重点工程建设中得到广泛应用，另一方面也可以用于医院、银行、机场、宾馆、通信等行业的备用电源。我国内燃机电站行业企业2013年完成工业总产值116.09亿元，同比增长4.19%；工业销售产值108.99亿元，同比增长5.13%；主营业务收入105.09亿元，同比增长6.63%。25家主要企业电站产品共实现销售收入84.15亿元，同比增长5.84%；实现产品利润8.05亿元，同比下降5.73%。

当前我国在内燃机发电机组行业还有很多未突破的技术问题，大型环保及资源综合利用设备中的煤矿瓦斯发电成套设备、百万千瓦级核电机组中二代改进型核电机组中的应急柴油发电机组等均属国家重大技术装备的配套装备，对发电机组的研发提出了挑战。

1.2.5 内燃机工业对机车装备的支撑作用

为了适应中国铁路的飞速发展，进入 21 世纪，中国的交—直—交电力传动内燃机车研制取得成功，研制出了东风 4DAC、东风 8BJ、东风 8CJ 等交流传动内燃机车。2014 年年底，全国铁路机车拥有量为 2.11 万台，其中内燃机车占 45.0%。近些年，我国内燃机车仍在不断发展，2015 年，中国南车研制出了世界功率最大的 3 000 马力油电混合动力机车和 5 000 马力双燃料内燃机车，中国北车研制出了适用于西部高原、高风沙环境的 HXN3 高原型内燃机车，已于 2015 年在青藏铁路开始使用，填补了我国高原铁路客货运输生产无国产内燃机车的空白。

当前，高铁已经成为“中国制造”新名片，仅 2014 年，中国北车、南车出口签约额均超过 30 亿美元，同比增长均超过 60%。未来随着“一带一路”建设和我国高铁走出去步伐的不断推进，会进一步带动我国机车内燃机的发展。由于内燃机车不受输电线路的影响，在我国铁路交通中仍然起着不可或缺的作用。

1.2.6 内燃机工业对国防装备的支撑作用

国防科技和武器装备是军队战斗力的物质基础，是国防现代化的重要标志。内燃机作为履带车辆、轮式车辆、移动电站、军用无人机等装备的动力源，对国防装备的发展起着十分重要的作用。

1. 履带车辆装备

主战坦克是重要的陆上作战国防装备，主站坦克发动机的功率逐渐增大，其发展历程如表 1-2 所示。我国装载内燃动力的坦克车辆在动力性方面实现了与国外先进第三代主战坦克相同的性能指标，自主第三代主战坦克组成的检阅方队在 2009 年国庆阅兵式和 2015 年的阅兵式上亮相。

表 1-2 我国主战坦克的发展历程

主战坦克分类	发动机参数	
	发动机型式	功率（kW）
第一代	V12 柴油机	382
	V12 柴油机	426
第二代	V12 废气涡轮增压柴油机	537
	V12 废气涡轮增压柴油机	588
第三代	V12 废气涡轮增压中冷柴油机	882
	V12 废气涡轮增压中冷柴油机	1 103

主战坦克动力正在朝小型强化（downsize）、高功率密度方向发展。未来的主战坦克动力将是一个具有二级涡轮增压系统、高压共轨燃油喷射系统、更小缸径和排量、更高转速、更高功率密度的现代高速高强化柴油机。

2．轮式车辆装备

轮式车辆装备动力从汽油机和自然吸气式柴油机，发展到现在的电控涡轮增压中冷柴油机，简化了后勤保障，提高了轮式车辆装备的机动性、可靠性、环境适应性和信息化程度。二代、三代车辆装备发动机发展情况见表 1-3。

表 1-3　二代、三代车辆装备发动机发展情况

车型类别	柴油机参数	
	发动机型式	功率（kW）
二代 0.5t 轻型车辆	4 缸增压中冷涡流室式柴油机	101.5
二代 1.5t 轻型车辆	4 缸增压中冷直喷柴油机	85
二代 3.5t 轻型车辆	6 缸增压中冷直喷柴油机	114
二代 5t、7t 中型车辆	6 缸增压中冷柴油机	147 ～ 225
二代 15t 重型车辆	6 缸增压中冷电控泵喷嘴柴油机	336
三代轻型高机动	4 缸增压中冷柴油机	112
三代中型高机动	6 缸增压中冷高压共轨柴油机	250

我国轮式车辆用发动机主要性能指标已经达到国外电控高压共轨技术第三代水平，极大地缩短了我国在电控柴油机与国际先进水平之间的差距，保证了我军陆军机动装备动力系统的自主安全性。

3．无人机

根据美国蒂尔集团发布的最新全球无人机市场预测，预计未来 10 年，无人机将继续成为世界航空航天工业最具增长活力的市场，其中全球军用和民用无人机销售额将由 2015 年的 64 亿美元增至 2024 年的 115 亿美元，10 年支出总额将超过 910 亿美元，10 年复合增长率为 6.7%。预计到 2024 年，民用无人机市场份额将由目前的 11% 增加至 14%，即 16 亿美元。

当前我国无人机无论从研制的种类还是性能上，都已经进入世界第一集团，中国无人机甚至走在欧美的前列，已经掌握了无人机用活塞式发动机核心技术，生产制造形成了一定规模，产品综合性能达到国外同类型无人机发动机水平。

4. 军用舰艇

我国较大功率舰艇用柴油机制造，从引进技术到完成了国产化工作，走过了几十年的时间。目前，已经具备自主开发、生产满足各类舰艇主机和辅机用柴油机的能力，单机功率可达 2.9 万～ 3.6 万 kW。

随着未来舰船主动力向大功率、高速、高密度柴油机方向发展，舰船柴油机的发展趋势是：采用高增压技术提高功率，改善工作过程，提高经济性，以进一步降低燃油消耗率；采用新型结构和材料，提高可靠性和寿命；运用监控技术，提高操纵管理的自动化程度；应用减振降噪技术，提高舰艇的隐蔽性。

1.3 内燃机在节能减排中的作用

内燃机在国民经济和国防建设中是不可或缺和不可替代的。同时内燃机在使用中消耗掉了大量的能源，排放了大量的温室气体和有害物质，内燃机的能源消耗与污染物排放是正相关的。内燃机的技术进步关系到我国的能源战略的顺利实施和大气环境治理的质量。

我国的汽车保有量与发达国家的人均数值相比还有很大差距，必将进一步增加，所带来的能源消耗也相当可观。因此，作为高新技术载体的内燃机动力在节能减排方面还有很大的潜力，必将为我国的节能减排战略实现做出巨大贡献。

1.3.1 我国的节能减排战略

1. 能源

近年来，我国经济持续快速发展，对石油资源的需求不断增长，能源供需矛盾日益突出，对进口石油的依赖度不断提高。同时，我国汽车工业发展迅速，产销总量持续增长，对石油的需求量也随之增加。2014 年我国石油表观消费量超过 5.0 亿 t，进口依存度接近 60%。目前，汽车用汽柴油消费占全国汽柴油消费的比例已经达到 55% 左右，每年新增石油消费量的 70% 以上被新增汽车所消耗。预计在未来一段时期，我国汽车保有量仍将持续增长，由此带来的能源紧张问题将更加突出。

能源是人类社会赖以生存和发展的必备条件，人类社会的发展特别是经济发展与能源的消耗是成正相关的。图 1-4 给出了 2013 年和近十年的 GDP 增长与能源消耗之间的对应关系。由图可见，较高的 GDP 增长，对应着较大的能源消耗，无论是当年的数据还是十年平均数据都说明了这一点。

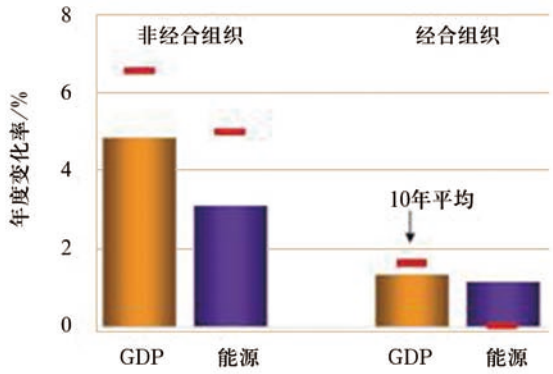


图 1-4　2013 年和近十年 GDP 增长与能源消耗的对应关系

有史以来，人类一直在使用着不同形式的能源，能源的消耗不断增加。特别是工业化以后，能源的消耗更是井喷式的增长。纵观人类的能源消耗，绝大部分来自于太阳能。其中煤炭、石油、天然气和木材（目前木材已经不能归于能源了，而在过去木材也曾被用于燃烧产生热能）等来自于亿万年来地球上所存储的太阳能。那些非太阳能的能量来源，诸如：地热能、潮汐能、核能等，迄今为止被人类极有限地利用着。而水能和风能则来自于太阳实时作用所产生的能量，至于利用太阳能光伏发电则是最为直接利用太阳能的例子。另一方面，世界上所有生物的生长发育所需要的能量也来自于太阳能，其中为人类本身提供能量的所有食物均来自于太阳能。人类所利用的能源结构也在不断地发生变化。图 1-5 和图 1-6 所示为人类利用能源的变化趋势及当前世界和我国的能源结构。迄今为止，人类所利用的能源主要来自于亿万年来所储存的从太阳能转化而来的化石能源。

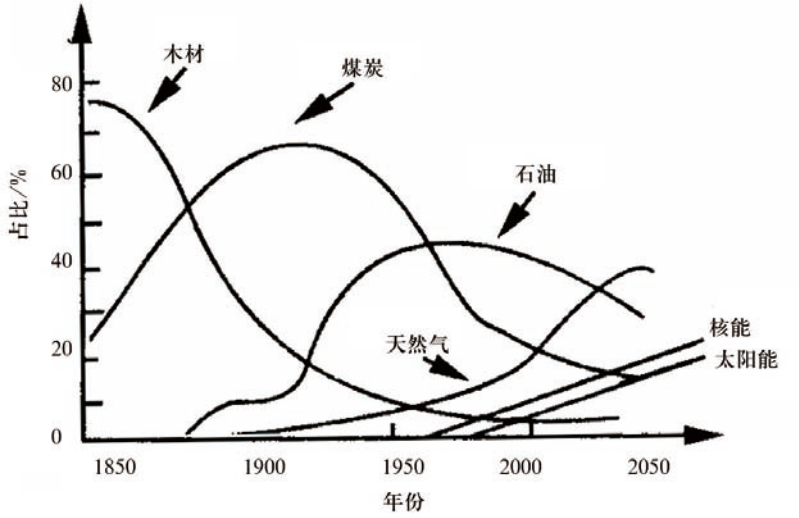


图 1-5　世界能源结构变化趋势

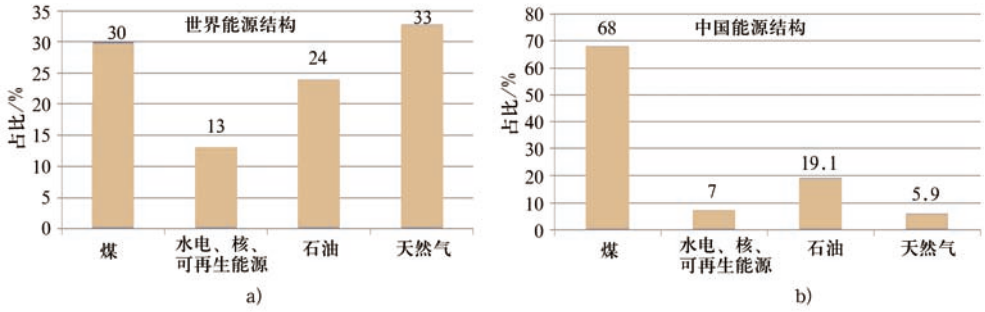


图 1-6　世界和中国的能源结构状况

2. 环境

地球表面及其大气空间是人类生存的环境。地球经过亿万年的演化达到一个相对自然平衡的物理化学条件，进而形成了有利于生物繁衍进化的自然环境。自从有了人类文明以后，人类对自然环境的影响已经打破了原有的自然平衡状态。随着矿产的开采、农药和化肥的不当使用、化石燃料的消耗等等，生态平衡遭到破坏。

环境污染对人类的生产和生活带来了严重的危害。20 世纪在全球发生了诸多有代表性的环境污染事件。这其中包括：比利时马斯河谷烟雾事件（1930 年）、美国多诺拉延误时间（1948 年）、伦敦烟雾事件（1952 年）、洛杉矶光化学烟雾事件（20 世纪 50 年代）、日本水俣病事件（20 世纪 50 年代）、日本富士山骨痛病事件（20 世纪 50—60 年代）、日本四日市哮喘病事件（20 世纪 60 年代）、日本米糠油事件（20 世纪 60 年代）、印度博帕尔事件（20 世纪 80 年代）、北美死湖酸雨事件（20 世纪 70 年代）、莱茵河污染事件。其中英国伦敦烟雾事件中，仅仅 4 天时间有 4 000 多人丧生，在随后的两个月里又有 8 000 多人罹难。在美国洛杉矶光化学烟雾事件中，洛杉矶光化学烟雾事件导致松林枯死、柑橘减产、老年人呼吸系统损害甚至死亡。仅 1951 年到 1952 年两年时间内，空气污染给美国经济带来大约 15 亿美元的损失。研究表明，洛杉矶光化学烟雾的成因主要是汽车尾气排放。

近年来，我国由于工业排放和汽车尾气排放所导致的环境污染问题日趋严重，最为突出和直观的就是雾霾。据有关部门的研究分析，京津冀地区的雾霾中有 30% 以上来自机动车尾气排放。在机动车排放的尾气中，柴油车的 NO_X 排放占整个机动车的 65% 以上，微细颗粒物 PM 占 90% 以上。内燃机作为机动车的主要动力，因此，加大内燃机的排气污染治理力度刻不容缓。

3. 能源和环境是世界各国关心的重要问题

为了实现经济持续增长以及尽快解决包括能源与环境在内的各种社会发展问题，世界主要国家或地区都制定和发布了面向未来的科技与产业创新战略。例如，美国制定并发布了《美国创新战略：努力实现可持续增长和高质量就业》和《美国创新战略：保障经济增长和繁荣》，日本制定了《2025 创新战略》和《新增长战略》，英国提出了《英国研究愿景》，德国制定了《2020 德国高科技战略》，法国制定了《国家研究与创新战略》，俄罗斯制定了《创新 2020：至 2020 年俄罗斯联邦创新发展战略》，印度发布了《使印度成为全球科学领袖》报告，欧盟发布了《欧洲 2020：智能、可持续与包容性增长战略》。在这些战略规划中，都涵盖了能源与环境问题，并将“绿色增长与可持续发展”作为重要战略目标。

4. 节能减排在中国

我国政府十分重视节能减排，制定了一系列方针政策。“十二五”规划纲要中明确指出：坚持把建设资源节约型、环境友好型社会作为加快转变经济发展方式的重要着力点。深入贯彻节约资源和保护环境基本国策，节约能源，降低温室气体排放强度，发展循环经济，推广低碳技术，积极应对全球气候变化，促进经济社会发展与人口资源环境相协调，走可持续发展之路。国务院办公厅于 2013 年 2 月 6 日发布了《国务院办公厅关于加强内燃机工业节能减排的意见》（国办发〔2013〕12 号）。作为负责任的大国，中国政府向全世界承诺 2030 年左右 CO_2 排放达到峰值且将努力早日达峰，并计划到 2030 年非化石能源占一次能源消费比重提高到 20% 左右。

在《中国制造 2025》行动纲领中也强调重点行业单位工业增加值能耗、物耗及污染物排放要明显下降，控制和削减化石能源消费量。在节能与新能源车方面继续支持高效内燃机等核心技术的工程化和产业化能力，形成从关键零部件到整车的完整工业体系和创新体系，推动自主品牌节能与新能源汽车同国际先进水平接轨。

从节能和控制温室气体排放的角度出发，战略上分三步走：第一步围绕全面建成小康社会，大幅降低碳排放强度；第二步是围绕大力推动生态文明建设，要从碳排放强度转向碳排放总量控制，在控制温室气体排放方面迈出实质性的一步；第三步是在控制碳排放总量、大幅度降低碳排放强度的基础上，要尽快实现碳排放峰值的到来。

为降低汽车排放污染物，我国制定了不同阶段的排放法规。目前，北京、

上海等地执行的是第五阶段排放法规，全国将在 2018 年开始执行国Ⅴ排放法规。我国正在加紧进行汽车尾气污染物排放国Ⅵ标准的制定。从目前城市降低排放的现状来看，有可能北京、上海、珠三角和长三角等部分地区率先执行国Ⅵ排放法规，排放标准的严格实施，对降低内燃机排放提出更高的要求。

1.3.2 内燃机的能源消耗与污染物排放

国务院办公厅在 2013 年发布的《关于加强内燃机工业节能减排的意见》中明确指出，内燃机是交通运输、工程机械、农业机械、渔业船舶、国防装备的主导动力设备，内燃机工业是重要的基础产业。

内燃机是迄今为止移动机械中最主要的动力源。虽然电动车已经批量生产并将在国家政策鼓励下进一步发展，但是，按照国发〔2012〕22 号文件《国务院关于印发节能与新能源汽车产业发展规划（2012—2020 年）的通知》中所描述规划的，纯电动汽车和插电式混合动力汽车的累计产销量到 2015 年力争达到 50 万辆，到 2020 年超过 500 万辆。截至 2014 年 11 月，国家四部委正式成立联合调查组，深入 39 个新能源汽车试点城市进行调研，按照计划，2013 年至 2015 年 39 个推广应用城市将累计推广新能源汽车 33.6 万辆，但截至 2014 年 9 月，完成的推广量仅为目标量的 11.49%。2014 年电动汽车的销量增长 5 倍，由此可见，在汽车工业中新能源汽车已经进入增长期。但是，由于其基数太小，在今后相当长的时期内内燃机还是在汽车工业中占主导地位。

根据中国能源研究会发布的《中国能源发展报告 2014》提供的数据，在能源生产与消费方面，2013 年我国能源消费总量达 37.5 亿 t 标准煤，同比增长 3.7%，其中，原油消费量 4.83 亿 t，同比增长 3.4%。而 4.83 亿 t 原油的 60% 以上被内燃机消耗掉了。按照原油折合标准煤的比例为 1∶1.43 计算，内燃机消耗的原油相当于 4.14 亿 t 标准煤，占我国全年能耗总量的 11% 以上。目前我国的能源消耗多用标准煤来统计，一般认为标准煤的 CO_2 排放因子为 2.7，即每吨标准煤完全燃烧后会产生 2.7tCO_2。汽油和柴油的 CO_2 排放因子 3.2 左右。由此，根据《中国能源发展报告 2014》提供的数据得到， 2014 年由内燃机排放的 CO_2 至少占我国 CO_2 总排放量的 14.6%。

内燃机在国民经济和国防建设中是不可或缺和不可替代的。同时内燃机在使用中消耗掉了大量的能源，排放了大量的温室气体和有害物质。内燃机的技术进步关系到我国的能源战略的顺利实施和大气环境治理的质量。

1.3.3 高效内燃机将为节能减排作出重要贡献

目前我国的内燃机技术水平特别是能耗指标与世界先进水平相比还有较大差距，内燃机节能潜力巨大。

为应对全球性的资源短缺和气候变暖，巩固和提高汽车工业未来国际竞争力，欧美日等汽车工业发达国家都在采取积极措施，推动和促进汽车节能技术发展、提高汽车燃料经济性水平，相继完成新一轮针对 2020 年甚至更长远的各年度乘用车燃料消耗量标准法规制定，对乘用车燃料消耗量及对应的 CO_2 排放提出更加严格的要求。

2010 年 3 月美国汽车研究理事会（USCAR）组织召开了有美国和欧洲 29 个权威学术机构参加的学术会议，对关于提高内燃机热效率的研究达成了共识："活塞式内燃机最高有效热效率，不考虑摩擦损失可以达到 60%"（当前是 40% 或略高）；"经过根本性改造，内燃机最高热效率可望超过 60%，但小于 85%"。在实际应用中，2009 年美国能源部（Department of Energy，DOE）宣布，将在 2010—2015 年投资 2.7 亿美元开展"超级卡车"计划，目标降低燃油消耗 50%。美国能源部要求 2020 年重型柴油机热效率由当前的约 42% 提高到 55%，乘用车汽油机由 28% 提高到 45%，2025 年美国轻型汽车的平均燃料经济性要达到 4.3L/100km。2009 年欧盟颁布了强制性汽车 CO_2 排放法规，要求 2015 年轿车的 CO_2 平均排放低于 130 g/km，2020 年低于 95 g/km；2014—2017 年轻型商用车的 CO_2 排放比 2007 年降低 14%，2020 年进一步减少 28%，达到 147 g/km。2009 年英国汽车委员会提出的长期目标是汽车发动机能源利用率达到 70%。2011 年 8 月，日本提出 2020 年乘用车燃油消耗降低 24%，平均燃料经济性水平达到 4.9L/100km。

尽管各国乘用车保有结构和技术特征存在一定差别，对乘用车节能指标的要求也不同，但从整体来看，各国都在通过技术标准和法规不断加严乘用车燃料消耗量要求，整体趋势是到 2020 年乘用车平均燃料消耗量达到 5 L/100km 左右。

我国从 2012 年开始执行第三阶段油耗法规，按该法规 2015 年我国乘用车产品平均 CO_2 排放降至 161g/km，仅相当于欧盟 2006 年水平，与欧盟同时期相比油耗高出 23.8%。到 2020 年我国第四阶段燃料消耗量的 CO_2 排放限值预计将降至 117g/km，仍比欧盟标准高 23.2%。通过我国和世界主要国家或地区燃料消耗量标准对比（表 1-4），可以发现，我国与世界先进水平相比在内燃机燃油消耗率方面还有很大的差距。同时也说明节能的潜力还很大。如果按照图 1-7 所示的

发展趋势，假定我国的乘用车燃油消耗量能够达到美国标准和欧盟标准的中间值，即 4L/100km，则燃料消耗量将比 2015 年的标准降低 20%。

表 1-4　主要国家或地区燃料消耗量标准目标对比

国家或地区	2015 年		2020 年		2025 年		2016—2020 年均降幅（%）	2020—2025 年均降幅（%）
	CO_2	对应国标	CO_2	对应国标	CO_2	对应国标		
欧盟	130g/km	5.2 L/100km	95 g/km	3.8 L/100km	75 g/km	3 L/100km	5.4	4.2
美国（2017）	36.2m/g	6.7 L/100km	44.8 m/g	6 L/100km	56.2 m/g	4.8 L/100km	3.5	3.4
日本	16.8km/L	5.9 L/100km	20.3 km/L	4.9 L/100km			3.3	
中国	6.9L/100km		5 L/100km				5.5	

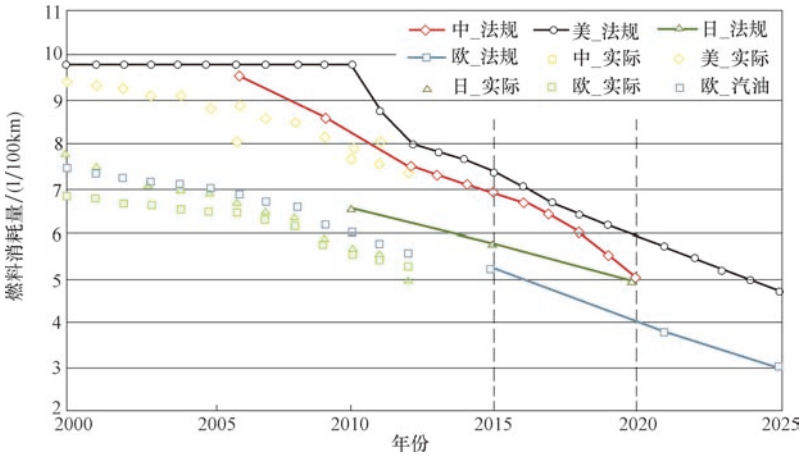


图 1-7　主要国家或地区燃料消耗量状态及标准对比

注：考虑试验方法特别是工况差异并转换我国试验方法对应数据。

第 2 章

基础与现状

我国内燃机工业经过多年发展，已形成了完整的研发、生产制造、服务体系，在现代工业经济建设和国防安全中已成为不可或缺的基础产业，发挥了举足轻重的作用。内燃机工业的持续发展，对降低能源消耗、保护环境，推动我国经济建设发展和人民生活水平提高起到重大作用。

2.1 我国内燃机产业与战略性新兴产业的关系

内燃机产业是国民经济发展和国家能源安全的基础和重要支撑。内燃机是以多门类、多学科先进技术集中体现的动力装置，是节能减排发展战略的重要环节，对经济社会全局和长远发展具有重大引领作用，是引导未来经济社会发展的重要力量，对推进我国现代化建设具有重要战略意义。

2.1.1 内燃机产业对战略性新兴产业的支撑作用

国务院常务会议 2012 年 5 月 30 日通过的《“十二五”国家战略性新兴产业发展规划》，明确了首批节能环保产业、新一代信息技术产业、生物产业、高端装备制造产业、新能源产业、新材料产业和节能与新能源汽车产业等 7 大战略性新兴产业的发展方向，该规划明确指出，重点开发高效内燃机的关键技术，再一次把内燃机确立到支撑战略性新兴产业发展的基础地位。现代的内燃机不是简单机械制造的产品，内燃机涉及高效节能、先进环保、资源循环利用等领域，内燃机产品融合了机械制造、新材料、信息化、液压、超精加工等工艺过程，成为机电液高度集成的产品。2015 年，国务院 28 号文发布的《中国制造 2025》，明确指出：“制造业是国民经济的主体，是立国之本、兴国之器、强国之基。十八世纪中叶开启工业文明以来，世界强国的兴衰史和中华民族的奋斗史一再证明，没有强大的制造业，就没有国家和民族的强盛。打造具有国际竞争力的制造业，是我国提升综合国力、保障国家安全、建设世界强国的必由之路”。提出了“立足国情，立足现实，力争通过‘三步走’实现制造强国的战略目标”，进一步强调“实现制造强国的战略目标，必须坚持问题导向，统筹谋划，突出重点；必须凝聚全社会共识，加快制造业转型升级，全面提高发展质量和核心竞争力。”

内燃机产业具有知识技术密集、综合效益好、市场潜力大、与其他产业的关联度高、带动能力强等特点，本身又是节能环保、高端装备制造的重要内容。自

从 20 世纪末特别是进入 21 世纪以来，随着电子技术、传感器和测试技术、电磁执行器技术、材料技术、先进制造和工艺技术以及控制技术等突飞猛进的发展，极大地提升了内燃机的技术进步，使内燃机实现了从燃油喷射系统、进排气系统、增压系统到配气机构、润滑系统、冷却和热管理系统、后处理系统、启停系统等的全面电控，内燃机的动力性、经济性（热效率）、排放性能、运转使用性能、耐久可靠性能等都得到了极大改进，内燃机已经不再是发明之初传统的机械产品，而是成为集信息等新技术应用的最佳载体和尖端技术应用的典型代表。智能化、信息化使内燃机产业焕发出了勃勃生机。内燃机技术的进步大大推动了节能减排技术和相关零部件产业的发展，催生了电控高压共轨喷射系统、电控排放后处理、电控可变气门或电控气门升程系统、电控可变增压器、混合动力等一系列技术。

内燃机产业不仅在经济上对战略性新兴产业具有极大的拉动和支撑作用，而其在政治上和军事上也具有十分重要的现实意义和深远的历史价值。

内燃机产业是发展战略性新兴产业的动力来源，是拉动国民经济发展、促进上下游众多产业发展和就业的主要动力。内燃机产业的发展为汽车、农机装备、工程机械、交通运输、国防建设、销售服务和维修等装备制造业、上下游产业的发展提供了强劲、高效、先进的动力，推动了汽车、农机装备、交通运输业、国防装备的技术进步和发展，对解决“三农”问题、拉动就业、促进经济社会转型和稳定都起着极大的推动和支撑作用。

内燃机产业的发展，对相关零部件、机床、铸造、热处理和机器人等产业提出了很大、很高的需求，促进了机械制造业、高档数控机床和铸造业、机器人、自动化、信息化、原材料、热处理等产业的发展。

内燃机节能减排潜力巨大，欧美日等发达国家在内燃机节能减排法规的推动下，围绕零部件和内燃机整机到整车和混合动力汽车，在一系列核心技术和小型化、轻量化等方面取得了新突破，诞生了一大批新技术新产品，如先进的高效清洁燃烧技术、电控燃料喷射系统、增压系统、后处理系统、VVT/VVA 技术、DCT 技术、启停技术、低摩擦技术、能量储存和余能回收技术、变速器、传动系、电机、电池和各种先进制造工艺技术、机电液的综合控制技术等等，实现了机械、电子和信息等各种技术和产业的高度融合，推动了石化行业以及节能环保、材料工业、高端制造装备、机器人、新能源汽车、电子和信息技术等战略性新兴产业的发展。

目前我国内燃机产品的热效率与世界先进水平相比还有较大差距，而与理想热效率相比可提高空间则更大。根据对国内内燃机技术状况研究分析表明，目前

我国内燃机的技术水平普遍不高，新技术的应用对外依赖性较高。柴油机热效率一般水平只有 42% ～ 45%，与国际先进水平相差 10% 左右，与理想目标相比至少还可提高 20%；而汽油机的热效率一般只有 30% 左右，与国际先进水平 38% 相比还可提高约 20%，与汽油机的理想目标（热效率可达 45% 以上）相比，至少还可提高 50%。

我国已开始全面执行第四阶段排放法规，而发达国家现在已经实施欧洲第六阶段的排放法规。在节能减排方面，我国内燃机产业与国际先进水平有较大差距，任务重，机遇多，发展潜力大。随着我国内燃机节能减排工作的深入展开，将诞生一系列新技术、新产品，从而促进和支撑战略性新兴产业的发展。

2.1.2 战略性新兴产业对内燃机产业的提升改造作用

我国内燃机产业与国际先进水平相比有较大差距，要充分利用发展战略性新兴产业的机遇，按照《中国制造 2025》行动纲领，实施制造强国战略，发展以高新技术的迅速发展和广泛运用为基本特征的战略性新兴产业，对于我国加快转变经济发展方式，使我国在世界新一轮科技革命和产业变革中抓住机遇必将发挥积极的作用，抓住内燃机产业升级新契机，推动我国内燃机产业生产组织方式和增长模式的转变，推动产业技术创新、结构调整、淘汰落后产能、推进绿色制造、智能制造，实现内燃机产业转型升级和提质增效。

发展战略性新兴产业对内燃机产业的提升改造作用主要体现在：

1. 加快内燃机产业的创新能力

《“十二五”国家战略性新兴产业发展规划》指出产业创新能力要大幅提升，企业掌握重大科技成果集成、转化能力大幅提高，掌握一批具有主导地位的关键核心技术，建成一批具有国际先进水平的创新平台。实施高效内燃机关键技术开发，加强制造技术与信息技术的深度融合，以数字化网络化、智能化制造为核心，推动产品创新、制造技术创新、生产和商业模式的创新；着力提高创新设计能力，延伸制造业产业链，提高产品附加值；加快建设以企业为主体、市场为导向的内燃机产品开发体系；造就一批掌握核心技术的创新型企业。

2. 对传统产业进行信息化和智能化改造

信息技术及其产业是战略性新兴产业的支柱和先导，是提高国家核心竞争力的关键，内燃机产业进行信息化改造是产业升级的重要环节，智能化是内燃机产品发展的一个趋势。

内燃机企业的信息化建设是内燃机企业实现信息化管理的关键。要建立以高

速数据网络为核心的企业信息基础设施、大型动态数据库，包括产品的设计、供应商管理、零部件仓储、生产制造过程、售后服务、网上交易等，为企业技术创新和研发设计提供强大技术支撑，构建基于信息流的高效企业管理模式。要实现内燃机产业的信息化改造，做到制造过程信息化、服务过程信息化，结合“互联网 +”技术，推动内燃机产业升级。

3. 新材料为内燃机轻量化和节能减排提供支撑

内燃机的生产需要消耗大量各种原材料，其中包括结构材料、功能材料、电磁材料、金属和非金属材料。新材料的技术进步，推动内燃机向小型化、轻量化、高强化、智能化发展，铝合金气缸体、复合材料油底壳、塑料齿轮室和罩盖、塑料进气管、碳纤维活塞、钛合金增压器等轻量化技术，耐高温涡轮材料，金刚石涂层低摩擦材料，以实现内燃机的轻量化和节能减排。

4. 提升内燃机产品质量

提高产品质量，是发展战略性新兴产业的关键。内燃机产业通过质量管理体制创新，推进关键基础材料、核心基础零部件 / 元器件和先进基础工艺的技术升级和质量提升，增强技术进步对质量提升的支撑作用，提高内燃机产品质量。

5. 促进内燃机绿色制造

传统内燃机制造企业生产过程中存在能耗大、效率低等问题。通过贯彻“再利用、再循环”的原则，推进内燃机绿色制造、循环低碳发展，促进内燃机再制造的发展。加大技术改造和设备更新力度，加快淘汰落后生产能力，提高能源资源利用效率。推行清洁生产和污染治理，推进内燃机再制造工程，促进循环经济的发展。

为促进装备制造业绿色发展，满足产品设计、制造、包装、运输、使用及报废的全生命周期的绿色化需求，采用精确成形、少或无等超精密加工技术；在生产制造过程中推广应用废气、废水、固体废弃物无害化处理和综合利用技术。内燃机产品通过专业化修复和升级改造的方法，实现内燃机及其关键零部件的循环再利用。

2.2 我国内燃机产业发展概况

内燃机行业在机械行业之中是跨行业、跨部门最多的行业之一，内燃机是交通运输、工程机械、农业机械、渔业船舶、国防装备、地质和石油钻机、旅游运动器械、园林机械和各种通用机械的主导动力设备，是各种配套产品的“心脏”，内燃机工业是重要的基础产业，对国防、工业、农业以及人民生活都有着重大的影响。

2.2.1 我国内燃机产业的特点

新中国成立以来，我国内燃机工业取得了长足进步，逐步建立了一个较为独立完整的制造体系，内燃机产品的技术水平有了很大提高，已成为全球内燃机生产和使用大国，成为支撑我国经济社会发展的重要基石和促进世界经济发展的重要力量。特别是改革开放后，内燃机行业根据国民经济发展的要求，不断对产品结构和企业结构进行调整，通过自行研制开发和引进国外先进技术，开发了一大批新产品；在国家出台有关排放法规和节能要求后，通过各种途径先后开发出一批满足国Ⅲ、国Ⅳ、国Ⅴ、国Ⅵ的发动机，生产出了一批可供汽车、摩托车、工程机械、船舶、农业机械、铁道内燃机车、内燃发电设备、石油钻机等产品选择配套的发动机机型，产品的结构趋向合理，产品质量和技术经济水平明显提高。

目前，我国内燃机产业主要具有以下特点：

1. 使用领域量大面广

截至 2015 年，内燃机产品销量累计 5 707.33 万台，总功率突破 21.4 亿 kW，总功率比 2015 年同比增长 1.14%，保有量达到 4.5 亿多台；我国农业人口众多，农业的经济形式以个体为主，因此对小型农业机械的需求量较大。单缸柴油机结构简单、易于使用和维修保养，被广泛配套于小型农业机械，我国产量居世界第一，2015 年总产量 276.34 万台。我国地形复杂，山区多，农村道路建设相对落后，摩托车作为代步工具和小型运输工具得到了广泛应用，因此，我国摩托车产量较大，2015 年产量超过 2 339.1 万台，其中出口到发展中国家 1 000 多万台。近年来，我国汽车工业得到高速发展。2015 年乘用车用内燃机全年累计销量 1 866.33 万台，商用车用内燃机全年累计销量 301.16 万台。此外，船用内燃机全年累计销量 4.34 万台；配套于我国农用机械用内燃机全年累计销量 527.79 万台；配套园林机械用内燃机全年累计销量 399.16 万台；配套于工程机械用内燃机全年累计销量 42.22 万台。由于很多地方的输配电配套措施不能满足经济发展需求，内燃发电机组在这些地区得到了广泛应用，发电机组用内燃机全年累计销量 180.80 万台。上述不同用途的内燃机构成了我国内燃机生产量大面广的特点。

2. 产业链长

内燃机产品构成复杂，零部件数量多，涉及到冷却润滑、后处理、电子燃油喷射系统、缸体缸盖、曲柄连杆机构等精密的运动副和摩擦副，例如连杆活塞销，承受数千巴压力的喷嘴和出油阀偶件，原材料还涉及到抗高温高压、耐腐蚀、抗

干扰、耐磨，还要满足轻量化等方面的要求。由于内燃机是配套主机的核心动力，要求具有完备的售后服务体系。这些构成了从原材料、零部件、设计、加工、制造、测试、生产以及配套和售后服务等各个环节，拉长了内燃机产品涉及的产业链。

内燃机产业链涉及的行业众多，具有较好的完整性和层次性。利用内燃机产业链长的优势，有利于降低内燃机制造企业的生产成本，有利于促进新兴企业的出现，有利于企业创新氛围的形成，有利于打造“区位品牌”，有利于区域经济的发展。

3. 就业面广与消费拉动大

内燃机产业涉及到众多相关领域，广泛采用了信息技术、材料技术，并在研究、设计、试验、制造、销售及售后服务的全过程应用，已成为高新技术产业。现代内燃机已经融合了电子、化工和新型材料、新工艺等诸多高新技术，发展成为一个高科技产品，给直接和间接相关从业人员提供众多工作岗位。内燃机既是消费性产品也是投资性产品，拉动了国民经济增长，截至 2015 年年底，我国内燃机产品社会总保有量已达到 4 亿台，提供了直接就业机会逾 40 万人，如果加上相关服务业那就更多。2015 年我国内燃机行业规模以上企业的主营业务收入快速增长，收入总额为 2 291.74 亿元。

2.2.2 产业结构概况

内燃机整机主要分为汽油机和柴油机两部分。汽油机主要由乘用车和微型车用汽油机、小型通用汽油机、摩托车用汽油机三部分构成。柴油机的产业结构比较复杂，单缸机主要配套于小型农用机械，中小缸径的多缸柴油机主要配套于轻型运输车和大型农业机械，大缸径多缸高速柴油机主要配套于商用车和工程机械，大缸径多缸中低速柴油机主要配套于内河运输和发电机组。

零部件的生产企业按产品在内燃机上的功能实现专业化生产，包括热交换器行业、燃油系统、滤清器、水泵机油泵、缸套活塞环、排放后处理、增压器行业、曲柄连杆机构等。

1. 汽油机

（1）车用汽油机　全国车用汽油机生产企业共有 45 家，除沈阳航天三菱汽车发动机制造有限公司外，其余 44 家企业都由汽车整车生产企业主导，其产销量超过 97%。多缸汽油机企业全年累计销量 1 946.82 万台。上汽通用五菱、东风日产、长城、长安福特、奇瑞等的同比增长更是达到了 9.73%、48.14%、31.08%、60.45%、29.44%。上汽通用五菱、一汽－大众、上海大众动力总成、东风日产、

重庆长安汽车等 10 家排在前列，其总体销量占行业销量比例为 53.03%。

（2）摩托车发动机及通用小型汽油机　摩托车发动机行业集中度有所提高、全新车型增加、产品升级，对行业也带来了一定积极的影响。其中重庆隆鑫、力帆实业、大运、嘉陵、宗申、大长江及重庆银翔为行业龙头，实现批量外销，内销和外销比例 6 ： 4。行业内规模以上企业 50 余家，前 10 家生产企业销量占 50% 以上。重庆地区生产企业众多且实力较强，形成了产业集聚优势。

通用小型汽油机行业，2015 年小汽油机企业全年累计销量 907.79 万台，前五名企业为华盛、隆鑫、润通、中坚科技、林海，集中分布于重庆、山东、浙江、上海、福建和广东等地区，其中重庆地区产量约占总产量的 40%。

2. 柴油机

（1）车用柴油机　全国车用柴油机生产企业共有 23 家，独立发动机厂包括潍柴、玉柴及全柴等，其产销量占比达 58%，其余为整车企业主导占比 42%。合资品牌有 3 家，市场占有率为 9.7%，自主品牌占有率为 90.3%。销量前 10 位的市场集中度为 85%，其中自主品牌有 8 家。多缸柴油机企业 2015 年全年累计销量 357.12 万台。玉柴、全柴、潍柴、锡柴等销量前 10 位的企业占总销量的 65.79%。在多缸企业纷纷争夺的客车市场中，玉柴始终保持领先地位。广西玉柴机器集团有限公司、潍柴控股集团有限公司及中国一汽汽车集团股份有限公司年产销量达 50 万台以上，市场占有率为 41.5%。车用柴油机产品在重型车用柴油机领域有很强的竞争力，而在轻型车中使用较少。

表 2-1　2015 年国内前 10 位柴油机制造商销量情况

企 业 名 称	销量 / 万台	占总销量比例 /%
全柴动力	30.75	11.95
中国一汽	28.48	11.07
玉柴股份	26.88	10.44
江铃控股	25.33	9.84
北汽福田	24.04	9.34
潍柴动力	22.94	8.91
云内动力	21.80	8.47
东风汽车	15.37	5.97
山东华源莱动	10.12	3.93
中国重汽	8.81	3.42
合计	214.52	83.35

（2）非道路移动机械用发动机　作为内燃机生产大国，单缸柴油机是我国内燃机产业的一大特色，常柴股份有限公司、常发集团、江苏江动集团、全柴动力股份有限公司、山东华源莱动内燃机有限公司销量排名靠前，销量前 5 名企业市场占有率达到 44.76%，以常州地区为主导的农用单缸柴油机在亚洲享有一定的声誉。

工程机械用和农业机械用多缸柴油机，其车辆生产厂大多也生产销售车用发动机，区域规模不突出，无特点，特别面对新的排放法规实施，面临技术升级的挑战，与国际知名发动机生产厂相比，产品竞争力弱。其中农业机械方面，中国一拖集团有限公司是特大型企业，其生产的发动机主要为轮式拖拉机、履带拖拉机配套。主流的工程机械配套发动机厂家主要包括道依茨、珀金斯、康明斯等品牌的发动机企业。

船用发动机中，1 000kW 以上大功率柴油机主要集中在淄柴、济柴、重庆康明斯等企业。大功率船用柴油机领域基本上是国外机型许可证生产，存在引进技术后，消化吸收再创新的问题。造船工业迅速发展而自主品牌主机供应迟缓的问题亟待解决。

机车用发动机主要由中国中车股份有限公司下属单位生产。中国中车是全球规模最大、品种最全、技术领先的轨道交通装备供应商，其大功率机车、铁路货车已经达到世界先进水平。

3. 零部件

内燃机工业已经形成完整的零部件供应体系，包括基础原材料、燃油系统、增压系统、滤清器、排放后处理、冷却水泵和机油泵、电机电器、热交换器、气缸套和活塞环、曲轴和连杆、活塞和活塞销、轴瓦、进排气机构等系统部件和零件。生产企业有近 700 家，但是除水泵、机油泵外，市场集中度不高，与国外先进零部件技术水平相比仍有较大的差距。特别是先进燃油喷射系统等核心零部件，在技术创新和市场推广方面仍需加强。目前在增压器、燃油系统、后处理等关键零部件领域，行业正组织力量进行重点突破。

（1）燃油喷射系统　随着排放法规不断的升级，电控燃油系统已经成为新一代柴油机的必配装置。在排放法规的强力驱动下，此类产品装机量大幅增长。目前我国电控产品还无法完全满足车用发动机配套的需求，有超过 10 家企业在开发电控燃油系统（高压共轨系统等）以满足国Ⅳ及以后排放要求，如辽宁新风、湖南南岳电控及山东龙泵等。国家排放法规的实施以及产品升级换代的加快推进，

为燃油系统行业发展带来了巨大的发展机会。但行业传统的产品与国外产品相比，丝毫不占优势，相反差距还相当大，行业面临更大的挑战。

由于燃油系统行业的集中程度越来越高，少数企业的经营状况影响着行业数据走向，以国内企业为主生产的传统机械产品几乎没有新的生存空间，而国外品牌的电控产品却供不应求。从统计资料上看，尽管行业还在发展，但国外品牌占据了半壁江山。2015 年 1 月 1 日起，柴油车实施国Ⅳ排放标准。电控燃油系统产品（电控高压共轨系统、电控单体泵或组合式电控单体泵、电控高压分配泵）国内装机量比 2014 年有大幅增长。

我国目前电控产品还无法满足车用发动机的配套需求，虽然目前国内已有超过 10 家企业在开发电控燃油系统（高压共轨系统等）以满足国Ⅳ及以后排放要求。如一汽无锡泵所、辽宁新风、南岳电控、成都威特、龙口龙泵等单位都已投入相当力量开发自己的电控高压共轨系统，也取得了阶段性的成功。但是实际上还没有国内企业开发的电控高压共轨系统真正达到大批量生产和装机的阶段。在共轨系统生产中的关键技术以及稳定性、一致性、可靠性和成本等方面与德国博世（BOSCH）、日本电装（DENSO）等跨国公司相比有一定的差距。

（2）增压器及其系统　全球增压器市场排名前五位的生产厂商都在我国建立独资或者合资的研发和生产基地，如霍尼韦尔汽车零部件服务（上海）有限公司、博格华纳汽车零部件（宁波）有限公司、上海菱重增压器有限公司、长春富奥石川岛增压器有限公司、无锡康明斯涡轮增压技术有限公司，这些企业基本垄断了国内汽油发动机涡轮增压器市场。

国内自主品牌增压器企业与国际巨头的差距明显，主要集中在产能规模、研发实力、管理等方面。为主机厂配套的自主品牌企业形成“一超三强”的竞争态势。一超指湖南天雁，其产品以中、重型车配套为主；三强指康跃科技股份有限公司、潍坊富源增压器有限公司、宁波威孚天力增压器技术有限公司。目前，自主品牌增压器在华东、湖南及辽宁等地形成多个产业基地，初步形成产业集群。在华东地区，以康跃公司、富源公司、天力增压器技术有限公司为龙头，形成了集涡轮增压器及其零部件产品研发、应用、销售及配套为一体的研发生产基地，产品配套潍柴动力、上柴动力、玉柴动力、云内动力、长城汽车、北汽福田、天津雷沃、一拖集团、三一重工、江淮汽车等三十多家主机厂商；在湖南，以湖南天雁机械有限责任公司为代表，与玉柴、锡柴、潍柴、大柴等国内 30 余家主要发动机厂建立了稳定的配套和战略合作伙伴关系，增压器国内主机市场份额达到

22% 以上；在辽宁凤城地区，拥有增压器及配件企业 120 多家，生产各类增压器品种 3 000 多种，年产量 200 余万台（套），占国内企业总产量的 25%。凤城市生产的增压器及部件共为国内外 20 多家企业配套，出口 30 多个国家和地区。

凤城市在国内建立了唯一的省级汽车增压器产业技术创新战略联盟，全市有 25 家企业共同与 10 所著名高校和科研机构建立联合攻关产业技术联盟，进一步增强了产业技术创新能力。到目前，自主研发新产品达到 1 200 多种，申请和授权的专利达到 30 多项，已形成比较完整的生产涡轮增压器产业链，具有较强的创新能力和产业竞争优势。建立了辽宁汽车增压器试验与检测中心，成为支撑凤城增压器集群快速发展的内动力，并建立了一套与产业集群相关联的产业研发中心、产品检测和企业孵化器为一体的产业创新服务体系，规范企业标准和生产管理。有效地引导和规范企业生产与管理，用现代检测手段修正企业技术创新路线和提高产品质量，加速产品研发和工艺创新，以达到与国内外主机厂融合和产品配套。

从 2015 年主机配套市场上看，仍然是外资和合资企业为主，博格华纳等四家外资企业年产量在 100 万台左右，但外资或合资企业有较大比例的产品出口到中国以外的市场，如康明斯约有 30% 的产品销售到中国以外的市场。国内企业中湖南天雁产量约 60 万台，康跃产量约 36 万台，天力、富源的产量均在 30 万台左右，英特迈、丰沃的产量在 3 万台左右，集中度呈现两极分化特点。国内市场上高端产品几乎 100% 由几家外资企业生产；中端产品市场外资和国内骨干企业各约占 50%；低端产品主要由小规模企业生产。

（3） 排放后处理系统　随着汽油车国Ⅲ法规和柴油车国Ⅲ、国Ⅳ法规的深入推行，尾气后处理市场面临较大机遇。乘用车三元催化剂领域，外资品牌占 81.5% 的市场份额，自主品牌只占 18.5%。自主品牌中，无锡威孚力达、昆贵研、四川中自和安徽艾可蓝等几家形成了规模。

重型商用车方面主要使用 SCR 后处理技术，自主品牌占有 68% 的市场份额，包括无锡威孚、无锡凯龙、浙江银轮和天津亿利等厂家。高效 SCR 后处理和 DPF 等技术，国内企业与国外先进技术还有较大差距，有待突破。

自 2013 年 7 月 1 日，我国部分地区重型车开始执行国Ⅳ排放标准，重型商用车采用 SCR 系统在技术上是成熟的，2014 年起大部分地区逐步执行国Ⅳ排放标准。2014 年重型商用车销售量约 83 万辆（含大客车），而同期 SCR 系统的销量约 35 万套，占重型车销量的 42%。生产 SCR 系统的企业主要有无锡凯龙、无

锡威孚力达、浙江银轮和北京康明斯、天纳克等企业。

在国Ⅲ、国Ⅳ法规并行的背景下，取得如此成绩来之不易。但也应该看到，SCR 系统所使用的尿素水溶液（添蓝）的加注问题仍然没有得到有效解决，实现尿素水溶液加油站配套加注及加强市场监管是 SCR 系统有效应用的必要条件，这也是后处理行业能否更好更快发展的关键。

经过近几年来多方面的不断努力，轻型车的国Ⅳ排放技术路线已经趋向明朗，即在柴油机使用共轨系统的前提下，一是 EGR+DOC+POC（用于满足国Ⅳ排放标准）；二是 EGR+DPF（用于满足国Ⅳ和国Ⅴ排放标准）。

2015 年 1 月 1 日起全国实行国Ⅳ排放标准，福田、江铃、庆铃、云内、锡柴等企业采用高压共轨燃油系统的后处理措施满足了排放标准。通常轻型车采用 EGR+DOC+POC 的技术路线，但环保部门和部分业内专家对此技术路线持有异议，认为 DOC+POC 技术路线只是一个过渡方案，对转化效率和可靠性有一定担忧。环保部门和部分业内专家认为，EGR+DOC+POC 的技术路线中，应使用 DPF 替代 POC，因为 DPF 的捕集效率更高，且欧美发达国家已成熟应用 DPF 捕集颗粒物，但考虑到我国的油品及国内 DPF 技术水平等因素，目前尚未见批量投入市场使用的 DPF。 在 2014 年生产的 68 万辆国Ⅳ排放标准轻型商用车中，国内后处理系统企业中无锡威孚力达配套 32 万辆，天纳克配套 8 万辆，依柯卡特配套 6 万辆，艾可蓝配套 6 万辆，康明斯配套 4 万辆，无锡凯龙配套 3 万辆车，佛吉亚等其他厂家配套 9 万辆。

EGR 技术在轻中型商用车国Ⅲ以上排放技术路线中占据重要地位，2015 年 EGR 生产约 110 万套，其中约 68 万套与 DOC+POC 配套使用，满足国Ⅳ排放要求。EGR 的主要生产企业及产量是：无锡隆盛 30 万台、宜宾天瑞达 20 万台，浙江九隆 10 万台，此外还有常州星之路和天津益洁佳等企业 5 万台，外资企业主要有昆山皮尔博格 8 万台和宁波博格华纳 30 万台。EGR 总供货量中内资企业占 63.1%，外资企业占 36.9%。

DPF 技术是商用车解决 PM 问题的优选方案，且在美国已推广使用多年，但在我国却举步维艰，问题在于它的再生技术较复杂和碳化硅载体材料昂贵，在我国不易推广，因此前些年该项技术的研发和投入均严重不足，但近几年来电子控制技术进入商用车排放后处理领域使得 DPF 的再生技术有了较快发展，陶瓷载体 DPF 成为可能，另外钛酸铝 DPF 也已出现，此二种载体相较碳化硅而言成本可以较大幅度降低。因此可以预期在不久的将来，随着国Ⅳ、国Ⅴ排放标准的贯

彻实施，以及 DPF 技术研发走向成熟，DPF 技术将有更广泛的应用。当前，DPF 技术已被应用于在用车改造市场中，其对 PM 控制有明显效果，是近期内解决城市 PM 问题的可行办法之一。

总体而言，国内从 20 世纪 90 年代初开始研发汽车尾气催化剂、载体、封装等尾气后处理技术，直至现在的 SCR 和 DPF 零部件及系统集成技术，国内企业得到了有效的发展、取得了一定的成绩，目前自主品牌催化剂企业实力较强、产量最大的无锡威孚力达和昆贵研，产业集中度较高（约占国产催化剂 90% 以上），但与外资企业相比，无论是市场占有率还是技术水平，在部分产品上还有一定差距，国家如何从产业政策上支持我国自主品牌汽车和零部件企业的发展，是一个急待解决的问题。

4. 内燃机整机电控系统

电控系统由复杂精密的电器元件组成，在运行环境恶劣的内燃机上工作，影响其可靠性的关键因素主要有气候负荷、电器负荷、EMC 负荷、机械负荷等。目前内燃机用电控系统技术被欧美发达国家所垄断，国外已经将可靠性的理念由后期的产品验证提前到产品开发过程，同时将试验作为开发重要环节正向推动开发过程。在开发过程中通过热仿真、机械仿真、EMC 仿真建立基础开发平台，保证了其可靠性，同时降低了成本。目前国外电控系统可靠度达到了 97%, 电控系统产品使用寿命至少在 15 000h。

国内内燃机电控系统可靠性基础研究极其匮乏，在单一环境因素及组合环境因素作用下电控系统寿命曲线变化趋势的研究几近空白。目前国内通过常规模拟试验验证保证电控系统可靠性，这种方式试验效率低且成本高，无法得到环境对电控系统寿命的影响规律，不能形成对产品设计开发有指导性的技术支撑。目前国内电控系统可靠度约为 90%，使用寿命约是国外同类产品的 1/4。

国外电控技术成熟，博世、西门子、德尔福、电装等企业在电控系统领域具有很强技术实力。国内电控技术处于起步阶段，受技术等多方因素限制，高速高压电磁阀、喷油器、电子控制软件等核心技术受制于人。

5. 再制造产业发展迅速

作为一种独具特色的新兴产业，已经成为制造业和服务业的重要组成部分。内燃机工业再制造生产能力、企业规模、技术装备水平等显著提升，初步建立内燃机再制造标准化体系和满足旧件回收要求的逆向物流体系。内燃机相关可再制造产品多达 30 余种。失效内燃机的缸体、缸盖等关键零部件以及增压器、发电

机等主要配套件，多数为局部失效，通过成形、修复等再制造关键工艺技术，可在不改变形状和本体材质的情况下恢复其尺寸、精度和性能。与传统废金属回收利用处置方式相比，再制造能够回收失效产品所蕴含附加值的 70% 左右；与原始制造相比，再制造可节约能源消耗 80%、节约材料 70% 以上，降低制造成本 30% 至 50%。

目前市场上客户的认可度不够，用户对再制造产业还缺乏了解，消费习惯没有形成，市场认可与市场需求仍需大力培育。逆流回收是内燃机再制造的难点，回收旧件难。旧件是再制造企业的原料，没有原料就没法发展。修复技术是再制造产业区别于其他维修产业的关键。目前，国内的再制造联盟有 80 家成员单位。

2.2.3 产业地域分布情况

从表 2-2 中可以看出，内燃机产量占比超过 10% 的省（市）有 4 个，分别为吉林省、山东省、上海市和重庆市，占 46.5%，前十位省（市）占全国总量的 85.88%，按照地域划分，主要集中在华东、东北、华南和西北地区，地域规模优势不明显。

表 2-2 2014 年全国各省（市）内燃机产量及占比统计

地区	1—12 月止累计产量 / 万 kW	各省（市）占比（%）
全国	214 105.20	100.00
北京	12 616.27	5.89
天津	3 924.42	1.83
河北	1 624.77	0.76
山西	11.34	0.01
内蒙古	4.21	0.00
辽宁	16 999.50	7.94
吉林	28 748.85	13.43
黑龙江	2 764.66	1.29
上海	24 701.27	11.54
江苏	9 388.95	4.39
浙江	4 712.31	2.20
安徽	8 365.57	3.91
福建	119.96	0.06
江西	19.33	0.01

（续）

地区	1—12 月止累计产量 / 万 kW	各省（市）占比（%）
山东	23 260.80	10.86
河南	889.35	0.42
湖北	10 681.12	4.99
湖南	72.45	0.03
广东	17 627.86	8.23
广西	16 973.37	7.93
海南	725.37	0.34
重庆	22 878.47	10.69
四川	5 197.93	2.43
云南	1 466.57	0.68
陕西	330.51	0.15

2.2.4 资本或所有制结构情况

全国内燃机行业 644 家规模以上企业主要经济指标快报显示，2015 年 1—12 月全国内燃机行业规模以上企业累计实现主营业务收入 2 291.74 亿元。从全国内燃机行业规模以上企业不同控股企业实现主营业务收入看，2015 年，集体控股企业、私人控股主营业务收入高于上年同期，同比分别增长 1.16%、7.04%；国有控股企业、港澳台商控股、外商控股、其他控股企业主营业务收入低于上年同期，同比分别下降 17.98%、22.41%、8.54%、4.04%。（表 2-3）。

表 2-3 2015 年内燃机行业不同控股企业实现主营业务收入情况

控股类型	企业数 / 家	主营业务收入			
		本期 / 万元	上年同期 / 万元	增长率（%）	增长额 / 万元
总计	644	22 917 350	23 702 655	-3.31	-785 305
国有控股	55	4 983 078	6 075 421	-17.98	-1 092 343
集体控股	13	457 467	452 236	1.16	5 231
私人控股	499	11 471 156	10 716 708	7.04	75 449
港澳台商控股	11	130 849	168 647	-22.41	-37 799
外商控股	33	3 264 717	3 569 655	-8.54	-304 938
其他	33	2 610 083	2 719 988	-4.04	-109 905

2015 年全国内燃机行业规模以上企业累计实现利润总额 174.85 亿元，同比下降 9.54%，减少额为 18.44 亿元。从全国内燃机行业规模以上企业不同控股企业实现利润看，私人控股企业、其他控股企业利润总额高于上年同期，同比分别增长 5.46%、35.91%；国有控股企业、集体控股企业、港澳台商控股企业、外商控股企业利润总额低于上年同期，同比分别下降 33.49%、7.79%、13.88%、3.21%（具体见表 2-4）。

表 2-4　2015 年内燃机行业不同控股企业实现利润总额情况

控股类型	企业数 / 家	利润总额			
		本期 / 万元	上年同期 / 万元	增长率（%）	增长额 / 万元
总计	644	1 748 549	1 932 936	-9.54	-184 387
国有控股	55	495 932	745 688	-33.49	-249 757
集体控股	13	27 325	29 634	-7.79	-2 309
私人控股	499	610 335	578 736	5.46	31 599
港澳台商控股	11	5 069	5 886	-13.88	-817
外商控股	33	417 812	431 666	-3.21	-13 854
其他	33	192 076	141 326	35.91	50 751

2.2.5　对外交流合作概况

改革开放 30 年来，我国内燃机行业通过对国外先进技术的引进和消化吸收，大幅度地提高了产品水平，增加了技术积累，各主要内燃机企业的自主开发能力得到了一定的提高。国外许多跨国公司将发动机生产基地转移到中国，并把在中国生产的国外品牌发动机出口到海外；同时国内企业的自主品牌发动机产品也增加了出口。

我国内燃机行业突出节能减排主题，坚持对外合作与交流，坚持引进技术和消化吸收兼容并蓄，以不断推进行业技术进步，尤其是提升内燃机节能减排技术的水平。内燃机行业的对外合作和技术引进呈现出如下特点：一是对外合作和技术引进瞄准了与国际先进水平保持同步水准的发动机技术，尤其是节能减排技术；二是引进产品更着重在市场需要填平补缺的先进产品；三是国内企业和跨国公司通过合资合作形式引进技术和产品的项目发展较快、增加较多。如：重型车用柴油机方面，上汽菲亚特红岩动力总成有限公司引进意大利菲亚特动力科技公司（FPT）依维柯重型汽车用柴油机；北汽福田与德国戴姆勒公司合作引进戴姆

勒中、重型柴油机；广州日野汽车有限公司引进日野 E13C 重型车用柴油机等。轻型车用柴油机方面，东风朝阳柴油机有限公司引进美国万国公司 GD3.0 柴油机技术；北汽福田康明斯发动机有限公司引进美国康明斯 2.8L、3.8L 轻型柴油机；荣成华泰汽车有限公司引进意大利 VM2.5L、3.5L 柴油机等。天然气发动机，潍柴动力西港新能源发动机公司引进加拿大西港创新公司重型车用高压直喷 LNG 发动机和新能源动力系统等。

通过国际间的交流和合作研发，我国内燃机制造企业不仅获得到了先进技术和产品，更重要的是培养了科研骨干、学习了产品开发的全过程、掌握了先进的开发手段，大大增加了技术储备，为今后企业乃至内燃机全行业进一步发展自主开发和创新积累了宝贵的经验。

中国内燃机工业协会在 2012 年加入了国际内燃机工业协会，并在北京承办了 2013 年年会，促进了国内企业与国外同行的交流，方便行业企业及时了解国外主要国家和地区的技术、标准、法规动态。

2.2.6 行业发展环境概况

1. 国内发展环境

目前我国仍将处于重要的战略转型发展机遇期，受国际金融危机引发全球经济不稳定和低速发展的影响，调整和优化经济结构，转变经济发展模式，将成为主体的经济形势，由此会推动我国的发展模式由粗放型经济增长向集约型经济增长方式转型，由规模扩张的工业化模式转变为质量提升的增长模式成为必然和主流。

我国汽车工业经过多年高速发展，其产量已居世界第一。我国将会继续通过消费政策的拉动，有效的扩大国内需求、特别是消费需求，汽车工业自身将会通过实现产品的技术进步和水平的提高，推动汽车产品有序的进入国际市场。中国汽车工业将会继续保持较快的发展速度，汽车产量的持续增长和消费必将对内燃机的产量增长提出新的需求，同时对内燃机动力的低耗能和低排放提出更高的要求。

我国会继续加快“西部大开发”的进程，会有一批以推进西部交通、能源等基本建设为主体的项目开工建设。国家规划实施的重大“战略性新兴产业”将带动一批基础设施的重大建设项目：包括大型能源基地的开发建设及其配套能源输送大通道的建设；高速铁路、新建铁路和高速公路、大型港口等交通运输基础设施的建设。伴随着国家城市化和新农村建设的推进步伐，会出现大量

的居民住宅建设、社会主义新农村城镇化建设和农村道路建设等等。上述各类建设项目为工程机械、矿山机械、载重车辆及其配套的内燃机动力提供了一个非常广阔的市场。

未来五年是我国农业机械大发展的关键时期，提高农业装备水平和农机社会化服务体系建设、改善农业生产条件、增强农业综合生产能力、推进城镇化和加快新农村建设、调整优化城乡结构、拉动农村消费需求等，这些必将进一步带动面广量大的农机动力以及各种适合乡镇生活需求的内燃机动力的发展。

我国的国防现代化建设将持续稳定地发展。所需配套动力产品在品种和技术水平上必须及时跟上，以满足各种先进国防装备的需求。

内河航运、海洋渔业捕捞及远洋运输等船舶产业的发展为船用内燃机提供了更大的发展空间。休闲旅游产业以及低空飞行器的发展是国家战略性新兴产业之一，各类旅游、休闲、运动器械和低空飞行器将会有一个高速和高要求的发展态势，特别是游艇和低空小型飞机用高等级的先进发动机在目前以进口品牌为主的市场中，中国制造的产品将会面临由于质量的提升所带动而来的广阔市场需求。

21 世纪以来，国际跨国公司采用了独资、收购中方合资股份等不同的方式在我国新建和扩建生产厂。特别是以汽车用内燃机为主导的主机和零部件企业，他们以持有的先进核心技术和能实现我国节能减排技术法规要求的优势，迅速构成了新时期下对我国内燃机行业的市场挤压。

我国将积极发展低碳经济，增强可持续发展能力。我国在国际上已经作了“将进一步加强节能、提高能效工作，争取到 2020 年单位国内生产总值二氧化碳排放比 2005 年有显著下降”的承诺。加快编制出台发展低碳经济、循环经济、节能减排、环境保护及资源型城市经济转型等规划，增加资源环境方面约束性指标。在实施上述计划的过程中，内燃机产品由于既是燃烧源，又是排放污染源的特性，全行业在节能减排国策中将肩负重大的历史责任和社会责任。

当前在我国一次能源的消耗结构中，内燃机产品年消耗我国 60% 以上的石油能源，降低产品的燃油消耗是内燃机动力的核心技术指标和首选商业指标。今后开发具有竞争力的节能产品，必须从一般性被动研究转向应用型主动研究，内燃机的节能工作，将作为主导命题，贯彻至科研开发和产业应用全过程。开展高效燃用替代燃料的研究，也将成为我国今后相当长时期内的工作主题和核心。

技术创新是提高产业核心竞争力、提升产品技术平台的动力。内燃机行业应抓住有利机遇，以增强科技创新能力为目标，努力争取在内燃机产品高新技术领

域取得新的突破，并以此提升产业优势，优化整体产业结构。

近年来，民营资本在我国内燃机工业中发挥着不可或缺的重要作用，一些民营企业做出了很大成绩，具备了一定的规模和特色，行业将继续支持和鼓励民营资本注入内燃机整机和零部件企业，使之成为提高产品技术水平和质量，推动内燃机行业发展的一支重要力量。

我国内燃机经过多年的积累和发展，形成了一定的能力和基础，虽然和欧美日发达国家水平还有差距，但差距在缩小，为此结合国家“一带一路”战略，可以实施走出去战略（投资、海外建厂、技术输出等）。

2. 国际发展环境

随着经济全球化的发展，我国内燃机产品逐步融入世界内燃机市场体系。首先，我国内燃机及其各类配套主机在保持稳定快速发展的前提下，产品进入世界市场的比重会逐步增加。同时，中国也成为世界跨国集团最为关注的市场。中国内燃机制造企业和世界各国强手在我国本土上的竞争，已等同于在国际市场上的竞争。

内燃机是当今热效率最高、应用最广的移动机械用动力。其快速的发展和巨大的社会保有量同时也产生了一系列严重的资源和环保问题，在全球 50% 以上的石油资源被内燃机消耗掉的同时，其燃烧后排放的大量 CO_2 温室效应气体和以颗粒为主的各种有害气体，对环境和生态平衡产生了严重影响，尤其 CO_2 减排已经成为国际社会首要面临的问题。

随着电子技术、材料工业、精细化工、精密制造和测试技术等新技术的发展，为现代内燃机发展成为一种低耗能、低排放的高新技术产品打下了很好的基础。尽管国内外很多研究工作者一直在研究、寻找替代内燃机的新型动力，但至今尚未找到能完全替代现有往复活塞式内燃机的动力装置。预计在今后较长的一段时期，人类目前探索和研究的各种新能源动力还无法大规模替代内燃机的位置。因此，内燃机作为实施节能减排最有潜力的产品，进一步研发先进的汽油机和柴油机，努力减少燃油消耗和 CO_2 排放，是最有效和现实的途径。一方面大力研究发展新能源动力，另一方面在传统动力领域坚持进行大量行之有效的改进和提高，同时积极发展替代燃料在内燃机上的研究和推广应用，实行内燃机工业“三管齐下”的节能减排发展方针，最终实现节约能源和 CO_2 减排的总目标，这在国内外内燃机和汽车等相关工业界已达成共识。

为满足市场需求和社会需求，保证内燃机动力的优势竞争地位，全球内燃机

动力下一个发展周期的重点是产品动力性能最优化、经济性能最节约、环保性能最绿色。从可持续发展的战略高度上看，内燃机产品节能是产业持续发展的永恒主题，即使全部实现混合动力的节能目标，50% 以上的努力工作还要集中在内燃机上。

进入 21 世纪以来，在新能源动力的开发热潮中，基于对未来各种新能源动力和内燃机动力的技术发展和市场应用前景的比较分析，国际内燃机工业发达国家仍大力致力于内燃机高新技术的创新开发，既追求内燃机动力性、经济性和可靠性的最优化，又要使环境负荷最小化，从而达到兼顾经济增长和节能环保双重远景的实现。当今各大跨国集团和公司利用各种高科技手段在研究开发内燃机新技术和新产品方面都取得了很多重大突破性的成果。

2.3 政策与法规

内燃机工业是一个政策性、法规性非常强的行业，在行业综合发展、产品技术进步、产品市场竞争力等方面受相关的政策、法规影响非常大。和其他行业一样，政策、法规对内燃机工业来说也是一把双刃剑，一方面在短期内会通过淘汰落后产能、间接提高产品成本等方式限制行业的发展；但另一方面从长远角度看政策和法规也是促进行业技术进步及良性发展的最大驱动力，应该说内燃机工业近 20 年来的快速发展、特别是在节能环保产品技术方面的快速发展并快速和国际接轨，很大程度上得益于政策和法规的发展，政策、法规对推动内燃机工业的技术进步、提高行业的整体竞争力、促进行业的快速发展功不可没。

政策、法规存在时效性和先进性问题以及与其他相关行业的政策法规是否相互匹配的问题，内燃机工业在发展过程中也由于政策法规的不完善、相互之间的不配套等问题受到过影响。在节能、环保要求越来越高的国际、国内大环境下，作为战略性新兴产业，内燃机工业目前也面临着来自新能源动力的挑战。内燃机工业能否在竞争中胜出或与新能源动力齐头并进，很大程度上也会受制于相关的政策法规的科学性、时效性、先进性、合理性以及与相关领域的匹配性。

2.3.1 主要政策

截止到 2015 年年底，内燃机的社会保有量已经突破 4.5 亿台，消耗各类原油和液化油总量超过了 3.2 亿 t，与我国全年石油进口的总量相当，内燃机在大量消耗能源的同时，也排放出大量的废气，这被视为引发雾霾直接根源原因之一。

我国加大了对于节能减排的支持力度，尤其是对内燃机行业更是出台了不少相关的政策，促进内燃机行业向更加环保高效的方向发展。在这些政策中，以《中

国制造 2025》《大气污染防治行动计划》、国务院办公厅 12 号文件（即《加强内燃机工业节能减排的意见》）、国家工业和信息化部〔2012〕42 号文件（即《关于开展甲醇汽车试点工作的通知》）和国家工业和信息化部〔2013〕406 号文件（即《内燃机再制造推进计划的通知》）、国家工业和信息化部 2015 年第 74 号文《内燃机行业规范条件》等政策的作用最为突出。

1.《中国制造 2025》

《中国制造 2025》提出大力推动重点领域突破发展，节能与新能源汽车被作为重点突破领域之一。国家将继续支持电动汽车、燃料电池汽车发展，掌握汽车低碳化、信息化、智能化核心技术，提升动力电池、驱动电机、高效内燃机、先进变速器、轻量化材料、智能控制等核心技术的工程化和产业化能力，形成从关键零部件到整车的完整工业体系和创新体系，推动自主品牌节能与新能源汽车同国际先进水平接轨。

《中国制造 2025》一方面鼓励开发高效内燃机，为内燃机行业未来发展提供了重大机遇；另一方面汽车电动化也为汽车内燃机的发展带来了严峻挑战。因此未来 10 年将是汽车内燃机、特别是乘用车内燃机机遇与挑战并存的时代，如何通过和电动化、信息化的结合提高内燃机的竞争力将是未来 10 年值得内燃机行业研究的重大课题。

2.《大气污染防治行动计划》

大气环境保护事关人民群众根本利益，事关经济持续健康发展，事关全面建成小康社会，事关实现中华民族伟大复兴的中国梦。当前，我国大气污染形势严峻，以可吸入颗粒物（PM10）、细颗粒物（PM2.5）为特征污染物的区域性大气环境问题日益突出。2013 年，国务院出台了《大气污染防治行动计划》（以下简称“计划”），“计划”指出要强化移动源污染防治，提升燃油品质，加快淘汰黄标车和老旧车辆，加强机动车环保管理，严厉打击生产、销售环保不达标车辆的违法行为；加快柴油车车用尿素供应体系建设，开展工程机械等非道路移动机械和船舶的污染控制；加快推进低速汽车升级换代，不断提高低速汽车（三轮汽车、低速货车）节能环保要求，减少污染排放，促进相关产业和产品技术升级换代。大力推广新能源汽车，增加新能源和清洁燃料车的所占比例。

2014 年 4 月，工业和信息化部发布了第 27 号公告。根据公告，为落实《节能减排“十二五”规划》和《大气污染防治行动计划》，促进大气污染防治，减少汽车尾气排放，2015 年 1 月 1 日起国Ⅲ柴油车产品将不得销售。

3.《国务院办公厅关于加强内燃机工业节能减排的意见》

2013 年 2 月《国务院办公厅关于加强内燃机工业节能减排的意见》（简称《意见》）指出，将以企业为主体，以市场为导向，以科技为核心，以示范工程为抓手，加强统筹协同，完善管理制度和政策标准体系，建立健全激励约束机制，加快内燃机节能减排新技术的研发、应用和产业化，推进内燃机替代能源多元化应用，推动再制造产业发展，降低内燃机燃油消耗率，提高我国内燃机产品的节能减排水平和内燃机工业的国际竞争力。到 2015 年，内燃机燃油消耗率要比 2010 年降低 6% ～ 10%，将培育一批汽车、工程机械用发动机等方面的再制造重点企业；实现高效节能环保型内燃机主机及其零部件生产制造装备的国产化、大型化；建立内燃机产品节能减排政策法规和标准体系。

《意见》对内燃机制造过程的节能十分重视，指出将重点推广薄壁铸造、精密铸锻、热处理及表面加工等绿色制造工艺，实现内燃机生产过程的节能节材；鼓励企业在新产品开发和出厂试验环节使用具有高效能量回收功能的交流电力测功器，回收利用内燃机测试过程中产生的余热和电能。

备受业界关注的双燃料、生物燃油内燃机也是《意见》中的重要内容。《意见》指出，鼓励替代燃料发动机与现有发动机制造体系兼容。积极发展柴油 / 天然气双燃料内燃机、生物柴油内燃机；开展汽油 / 甲醇双燃料点燃式内燃机、柴油 / 甲醇双燃料压燃式内燃机的应用试点工作；加强内燃机高效燃油替代燃料、有效控制非常规排放等基础研究，重点掌握耐醇燃料供应系统、天然气供应系统、点火及其电控系统等关键核心技术；开发适于内燃机应用替代燃料专用润滑油和排气后处理技术。

《意见》提出了压燃式内燃机高压燃油喷射系统示范工程、点燃式内燃机缸内直喷燃油系统示范工程、内燃机高效增压系统应用示范工程、节能节材型小缸径多缸柴油机应用示范工程、替代燃料内燃机应用示范工程、船舶柴油机能量综合利用示范工程这六大重点工程。其中，替代燃料内燃机应用示范工程将开展天然气单一燃料及天然气 / 柴油双燃料燃烧技术在车船用发动机上的推广应用，以及柴油 / 甲醇双燃料燃烧技术在载重车、船舶、机车、固定柴油发电机组用重型柴油机上的应用，提高燃料供应系统关键零部件的耐腐蚀性和可靠性。到 2015 年，通过推广应用天然气单一燃料、双燃料及生物柴油内燃机，实现替代商品燃油 1 000 万 t；通过推广应用甲醇燃料内燃机，实现替代商品燃油 500 万 t。船舶柴油机能量综合利用示范工程将重点推动大型集装箱船、散货船和油船推广应用船舶柴油机机内净化、排气余热梯级利用及后处理技术，加强设备、系统优化组

合和智能控制。到 2015 年，实现单船综合能效比 2010 年提高 5%。

为了确保各项目标的顺利实现，《意见》提出了完善产业政策、健全标准体系、加强监督管理、加快技术创新体系建设、出台经济激励政策等一系列措施，指出将加快制定出台内燃机制造企业准入条件的有关规定，严格执行淘汰落后产品制度，发布内燃机节能产品推广目录；制定内燃机产品燃油消耗限值及测量方法标准和节能环保型内燃机产品技术标准，研究制定替代燃料内燃机产品技术标准和内燃机再制造工艺技术、产品质量、生产管理等标准；通过国家科技计划（专项）等渠道加大对内燃机节能减排技术研发的投入力度，加大内燃机工业技术改造投入力度，加快实施重点工程，加强企业技术研究中心能力建设，推动建设一批内燃机工业国家工程研究中心，强化跨部门、跨行业产学研的结合，提高内燃机工业自主创新能力，加快在内燃机产品节能减排关键核心技术方面取得突破。

4.《内燃机行业规范条件》

国家工业和信息化部 2015 年出台了《内燃机行业规范条件》，为内燃机行业设定了市场准入门槛，有效抑制盲目投资、低水平重复建设。该条件还将给行业内的领军企业带来更多机会，扶持行业领军企业加快技术创新体系建设，提高自主创新能力，带领整个行业的技术升级。《内燃机行业规范条件》通过准入门槛优化市场环境，为龙头企业解除发展中的后顾之忧，最终将其打造成具有国际综合竞争力的企业。

5.《关于开展甲醇汽车试点工作的通知》

随着甲醇燃料作为车用替代燃料越来越受到重视，使用甲醇燃料的汽车开发、试验等工作取得积极成果，结合我国国情，为全面科学评价甲醇燃料汽车技术现状、积累甲醇汽车运行管理经验、降低内燃机排放污染物，工信部于 2012 年发布了《关于开展甲醇汽车试点工作的通知》。《通知》指出在山西省、上海市、陕西省开展甲醇汽车试点，对高比例甲醇汽车的舒适性、可靠性、经济性、安全性、环保性等进行评价，明确甲醇汽车产品相关技术规范，制定标准，建立甲醇汽车相关标准体系。

6.《内燃机再制造推进计划的通知》

为落实《国务院办公厅关于加强内燃机工业节能减排的意见》，加快循环经济发展和节约型社会建设，促进内燃机工业形成循环型生产方式和消费模式，推动内燃机工业节能降耗，提升国际竞争力，根据《工业转型升级规划（2011—2015 年）》，工信部于 2013 年发布了《内燃机再制造推进计划的通知》，指出要突出重点领域，尽快形成内燃机再制造产业化规模；加快技术创新，大力提升

再制造技术能力和装备水平；发展逆向物流，保障再制造旧件稳定供应；完善标准体系，加强信息监管，规范再制造生产行为。

7.《汽车发展产业政策》

2009 年国家发展和改革委员会出台了《汽车发展产业政策》，其中第八、九、十条对内燃机行业发展有着重大影响。第八条：国家引导和鼓励发展节能环保型小排量汽车。汽车产业要结合国家能源结构调整战略和排放标准的要求，积极开展电动汽车、车用动力电池等新型动力的研究和产业化，重点发展混合动力汽车技术和轿车柴油发动机技术。国家在科技研究、技术改造、新技术产业化、政策环境等方面采取措施，促进混合动力汽车的生产和使用。第九条：国家支持研究开发醇燃料、天然气、混合燃料、氢燃料等新型车用燃料，鼓励汽车生产企业开发生产新型燃料汽车。第十条：汽车产业及相关产业要注重发展和应用新技术，提高汽车的燃油经济性。2010 年前，乘用车新车平均油耗比 2003 年降低 15% 以上。要依据有关节能方面技术规范的强制性要求，建立汽车产品油耗公示制度。

2.3.2 主要法规

经过 30 多年的发展，对内燃机技术发展有着重大影响的强制性法规包括排放法规、油耗法规、禁用物质法规等几大类已逐步得到完善。

1. 轻型车与重型车排放法规

1983 年我国颁布了第一批机动车排放标准，从控制汽油车和摩托车怠速排放的 CO、HC 浓度开始；柴油车控制自由加速烟度和全负荷烟度。1989 年颁布了第二批机动车排放标准，包括：汽油车曲轴箱排放控制标准；轻型车底盘测功机测量运行工况下的质量排放标准，引用的是欧洲 ECE1504 法规。1993 年颁布了汽油车燃油蒸发控制和重型汽油机的质量排放标准；燃油蒸发排放标准采用的是美国 SAE 碳罐收集法；重型汽油机的排放标准采用的是美国早期的稳态九工况测量方法。

从 1999 年开始，先后发布并实施了五个阶段的《轻型汽车污染物排放限值及测量方法》，轻型汽车的排放标准（GB 18352）。这些排放法规的实施，使得轻型汽车单车排放降低了 90% 以上，图 2-1 为轻型汽车主要排放物随排放法规降低幅度。标准的严格要求，促进了内燃机工业的技术进步和发展，带动了相关零部件行业的技术进步，为大气质量的改善做出了重大贡献。北京等城市开始提前实施“京Ⅴ”排放法规，预计 2017 年之后，将在全国范围内实施第五阶段排放法规，国家第六阶段排放法规的制定也已启动。

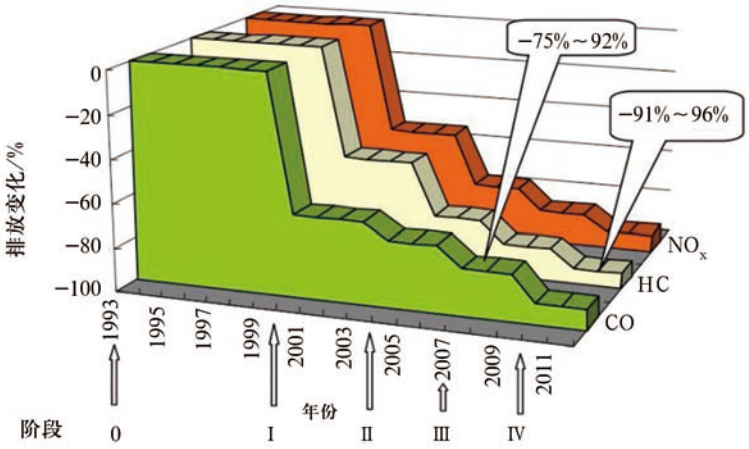


图 2-1　轻型汽车主要排放物随排放法规降低幅度

重型汽车的排放标准，包括重型压燃式发动机排放标准（GB 17691）和重型点燃式发动机排放标准（GB 14762）。重型汽车发动机排放法规的实施使主要颗粒物和 NO_X 两个排放物分别降低了 94% 和 76% 以上，图 2-2 为重型汽车主要排放物随排放法规降低幅度。不仅达到了保护环境的目的，也大大促进了电控系统、燃油喷射系统、排气后处理系统等相关零部件行业的技术进步，提高了我国重型柴油机产品的国际竞争力。

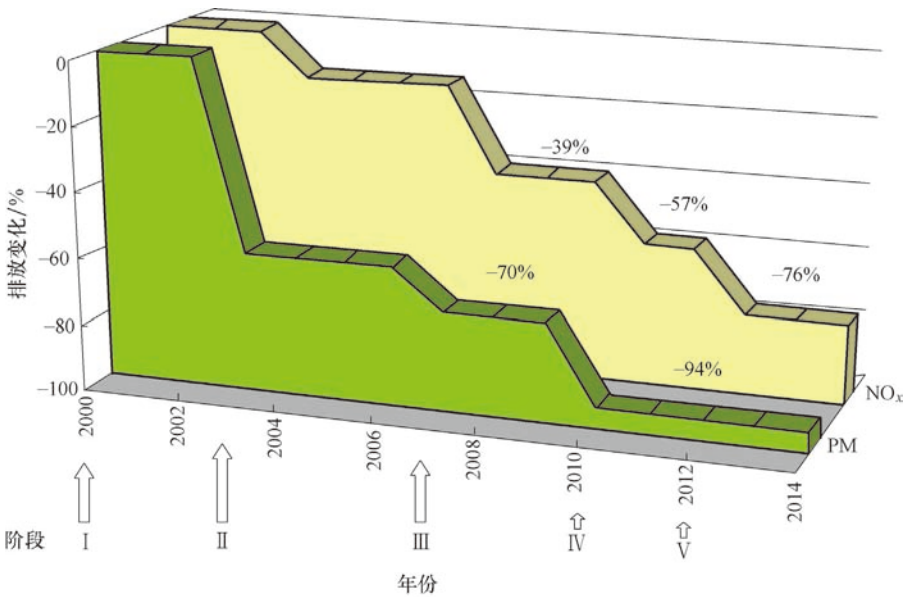


图 2-2　重型汽车主要排放物随排放法规降低幅度

《车用压燃式发动机排气污染物排放限值及测量方法》于 2001 年 4 月 16 日发布，参照欧盟 91/542/EEC 指令。

第一阶段：相当于欧Ⅰ水平，型式核准试验自 2000 年 9 月 1 日起执行，生产一致性检查自 2001 年 9 月 1 日起执行；

第二阶段：相当于欧Ⅱ水平，型式核准试验自 2003 年 9 月 1 日起执行，生产一致性检查自 2004 年 9 月 1 日起执行。

《车用压燃式、气体燃料点燃式发动机与汽车排气污染物排放限值及测量方法（中国三、四、五阶段）》，修改采用了欧盟指令 2001/27/EC 的有关技术内容，于 2005 年 5 月发布，分别于 2007 年、2010 年、2012 年 1 月 1 日实施。

《车用点燃式发动机及装用点燃式发动机汽车排气污染物排放限值及测量方法》，（GB 14762）于 2002 年 11 月发布，现已升级为 GB 14762—2008。

2. 非道路柴油机排放标准

GB 20891—2014 非道路移动机械用柴油机排气污染物排放限值及测量方法（中国第三、四阶段）。该标准规定了非道路移动机械用柴油机（含额定净功率不超过 37kW 的船用柴油机）和在道路上用于载人（货）的车辆用的第二台柴油机排气污染物排放限值及测量方法。该标准适用于非道路移动机械用，在非恒定转速下工作的柴油机的型式核准、生产一致性检查和耐久性要求。

GB 26133—2010《非道路移动机械用小型点燃式发动机排气污染物排放限值与测量方法（中国第一、二阶段）》于 2010 年 12 月 30 日发布，2011 年 3 月 1 日实施；适用范围：非道路移动机械装用的净功率不大于 19kW 小型点燃式发动机；净功率大于 19kW，但工作容积不大于 1L 的小型点燃式发动机，参照执行。控制的污染物：NOx、CO、HC；排放限值及相关管理要求，与欧盟指令相比主要不同点：增加了生产一致性保证要求；试验基准燃油符合中国燃油要求。测试方法：同欧盟法规的测试方法。

3. 摩托车排放法规

由于摩托车排放控制技术水平相对落后，尽管摩托车发动机排量小，但其每公里排放污染物仍然高于轿车水平。

在整个机动车（包括汽车、摩托车）排放中，摩托车碳氢化合物（HC）的排放分担率较高，约占 40%（2003 年）；摩托车的 HC 排放是全国小轿车的 3 倍，如图 2-3 所示（以 2007 年数据粗略计算）；国内现在有大概 90% 的城市空气都是颗粒物的超标，细微颗粒物的超标跟 HC 是有很密切的关系；我国从 1985 年

颁布了第一个摩托车怠速排放标准；1993 年颁布了 GB 14621—93《摩托车排气污染物排放标准》，包含工况法排放，引自 ECE R40-00 号法规，测量方法十五工况，控制 CO、HC，以及怠速排放：控制 CO、HC。2002 年颁布了中国第一、二阶段（相当于欧Ⅰ、欧Ⅱ）摩托车排放标准：GB 14622—2002。2007 年 4 月 3 日国家环保总局批准发布轻 GB 14622—2007《摩托车污染物排放限值及测量方法（工况法，中国第三阶段）》和 GB 18176—2007《轻便摩托车污染物排放限值及测量方法（工况法，中国第三阶段）》，图 2-4 为摩托车排放污染物随排放法规降低幅度。

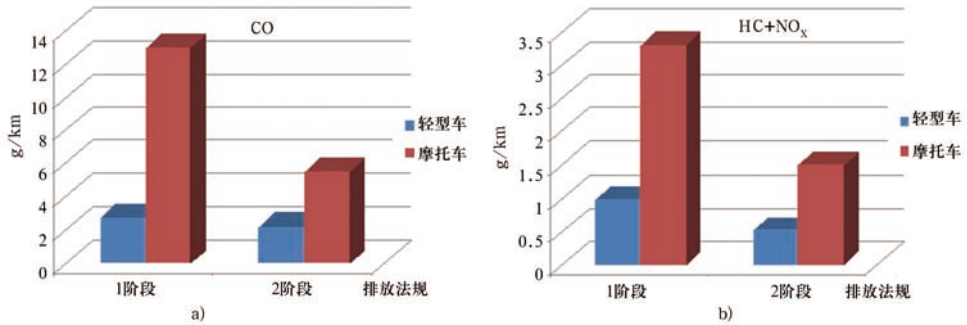


图 2-3　摩托车与轿车排放对比

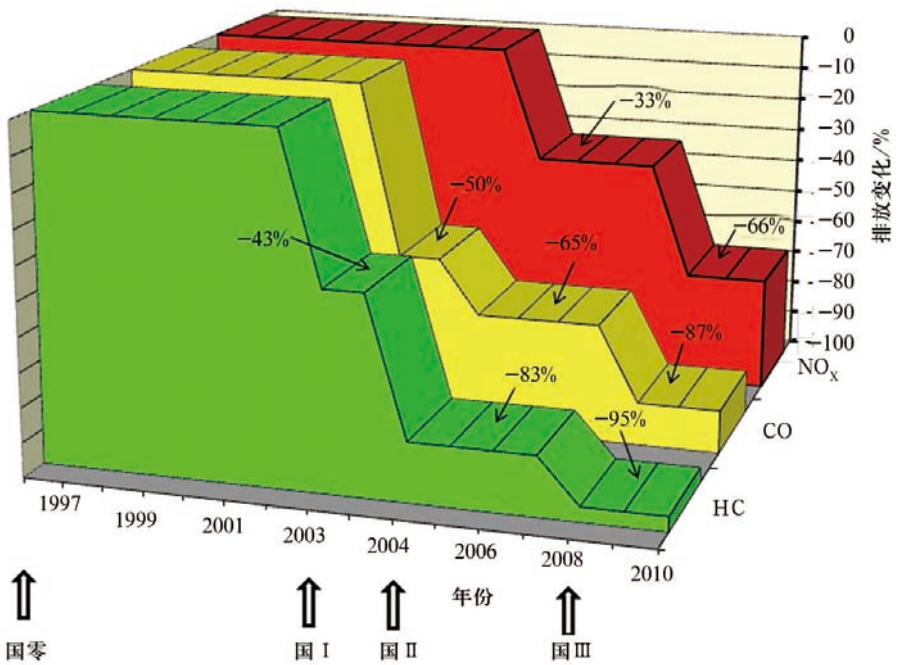


图 2-4　摩托车排放污染物随排放法规降低幅度

4. 船用内燃机排放标准

ISO 8178—4:1996《往复式内燃机排放测量　第 4 部分：不同用途发动机的试验循环》针对不同类型的船用内燃机规定了五种测试循环 E1 ～ E5。该标准只是测量方法标准，没有限值要求。该船用内燃机测量循环已被世界上多个国家采用，中国、欧盟、美国、日本、韩国、土耳其和俄罗斯等国家和地区对船用内燃机的测试都采用了 ISO 8178DE 循环。GB/T 15097—2008 《船用柴油机排气排放污染物测量方法》标准见表 2-5。

表 2-5　GB/T 15097—2008《船用柴油机排气排放污染物测量方法》标准

测量循环模式	项目	测量点							
		1	2	3	4	5	6	7	8
E2（恒速船用主机，包括柴油机电力驱动和调桨距装置）	转速百分数	100%	100%	100%	100%	–	–	–	–
	负荷百分数	100%	75%	50%	25%	–	–	–	–
	加权系数（W_F）	0.2	0.5	0.15	0.15	–	–	–	–
E3（按推进特性运行的船用主机和辅机）	转速百分数	100%	91%	80%	63%	–	–	–	–
	负荷百分数	100%	75%	50%	25%	–	–	–	–
	加权系数（W_F）	0.2	0.5	0.15	0.15	–	–	–	–
D2（恒速运行的船用辅机）	转速百分数	100%	100%	100%	100%	100%	–	–	–
	负荷百分数	100%	75%	50%	25%	10%	–	–	–
	加权系数（W_F）	0.05	0.25	0.3	0.3	0.1	–	–	–
C1（变速、变负荷运行的船用辅机）	转速百分数	标定转速				中间转速			怠速
	负荷百分数	100%	75%	50%	10%	100%	75%	50%	0%
	加权系数（W_F）	0.15	015	0.15	0.1	0.1	0.1	0.1	0.15

GD 01—2011《船用柴油机氮氧化物排放试验及检验指南》（2011）排放限值要求和实施日期和 MARPOL73/78 相同。NO_X 排放限值见表 2-6。

表 2-6　NO_X 排放限值

船舶建造日期	排放标准	NO_X 排放限值		
		$N < 130$	$130 \leqslant N < 2\,000$	$N \geqslant 2\,000$
2000 年 1 月 1 日或以后至 2011 年 1 月 1 日以前	Tier Ⅰ	17.0	$45\times n^{-0.2}$	9.8
2011 年 1 月 1 日或以后	Tier Ⅱ	14.4	$44\times n^{-0.25}$	7.7
2016 年 1 月 1 日或以后	Tier Ⅲ	3.4	$9\times n^{-0.2}$	2.0

为贯彻《中华人民共和国环境保护法》和《中华人民共和国大气污染防治法》，防治船舶发动机污染物排放对环境的污染，改善环境空气质量，《船舶压燃式发动机排气污染物排放限值及测量方法》标准的制定将极大地促进船用内燃机行业的技术进步。目前该标准尚未正式发布，处于征求意见阶段；计划自 2016 年 1 月 1 日起实施，鼓励有条件的地区提前实施。

我国现行的船用燃料油标准为 GB/T 17411—2012《船用燃料油》（该标准等效于 ISO 8217：2010），规定了 4 种馏分燃料油和 6 种残渣燃料油。馏分燃料油的硫含量限值为 1% ～ 1.5%，残渣燃料油中最常见的 180 ～ 700cst 运动粘度的规格，硫含量限值均为 3.5%。

5. 油耗法规

为应对汽车燃料消耗快速增长及由此引起的能源和环境问题，我国从 2001 年开始正式启动汽车燃料消耗量标准及政策研究。在借鉴国际先进经验的基础上，主要根据我国汽车产业发展实际情况，制定、发布并实施了 GB 19578《乘用车燃料消耗量限值》和 GB 27999《乘用车燃料消耗量评价方法及指标》等一系列有关汽车燃料消耗量试验方法、限值和标识的重要标准，建立了较为完善的汽车燃料消耗量标准体系（见表 2-7）。

表 2-7　汽车燃料消耗量标准体系

标识标准	◆轻型汽车燃料消耗量标识	GB 22757—2008
限值 / 目标值标准	◆乘用车燃料消耗量限值 ◆乘用车燃料消耗量评价方法及指标 ◆轻型商用车燃料消耗量限值 ◆重型商用车燃料消耗量限值	GB 19578—2014 GB 27999—2014 GB 20997—2007 GB 30510—2014
试验方法	◆轻型汽车燃料消耗量试验方法 ◆重型商用车燃料消耗量测量方法	GB/T 19233—2008 GB/T 27840—2011

虽然油耗法规为整车法规，但对发动机技术发展却有着决定性的影响，可以说从现在到 2020 年和 2025 年的乘用车发动机技术路线将主要受第三阶段和第四阶段油耗法规的影响，且发动机将承担整车 50% 以上的降油耗任务。

2.4　标准体系和标准化

内燃机标准是内燃机行业有序发展的技术支撑，内燃机标准化是内燃机标准在内燃机行业的应用，加强内燃机标准制定、实施、监督、服务、保障和国际化

体系建设，对内燃机行业健康有序的发展具有重要意义。

我国内燃机工业标准化工作经过几十年的建设，特别是改革开放 30 多年的发展，建成了一套基本上能满足我国内燃机工业发展需要的标准体系，内燃机标准化工作取得了显著的成果。目前，我国建立了以产品为对象分层次的内燃机工业标准化体系框架，确定了内燃机行业现在和今后一段时间内标准制（修）订工作的重点领域。该标准体系全面和系统地反映了内燃机标准现状和未来发展趋势；符合国家相关产业发展政策、规划以及今后一段时间的重点工作，明确了技术标准体系建设的重点领域和重点标准，适应了内燃机行业节能减排和转型升级的要求，初步开展了标准体系维护常态化工作。

目前我国内燃机相关标准工作主要由全国内燃机标准化技术委员会、全国燃料喷射系统标准化技术委员会、全国汽车标准化技术委员会发动机分技术委员会等标准化机构负责归口或管理。

截至 2014 年年底，由全国内燃机标准化技术委员会负责归口的国家标准有 102 项、行业标准 236 项，具体见表 2-8 所示，并建立了图 2-5 所示的体系框架。

表 2-8　全国内燃机标准化技术委员会负责归口的标准

标准类型	国家标准			行业标准			总计
	强制性标准	推荐性标准	合计	强制性标准	推荐性标准	合计	
基础通用标准	0	15	15	0	0	0	15
产品标准	8	48	56	2	205	207	263
方法标准	0	31	31	0	28	28	59
管理标准	0	0	0	0	1	1	1
合计	8	94	102	2	234	236	338

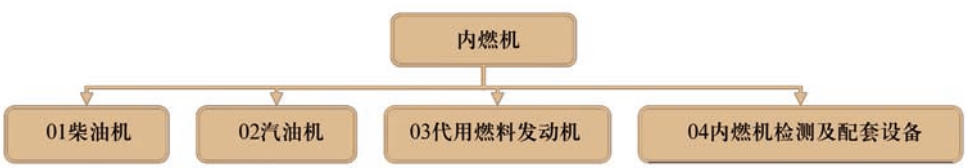


图 2-5　内燃机专业领域的标准体系框架图

“十二五”期间，内燃机行业根据国家相关产业政策确定了内燃机行业“十二五”标准制（修）订重点领域：电控燃油喷射系统、替代燃料发动机及其关键零部件、内燃机排放控制和后处理系统、内燃机节能（包括企业的单位能源消耗）、节材（包括再制造）、高效涡轮增压、内燃机及关键部件可靠性、关键件电控技术、内燃机生产过程安全。内燃机专业领域“十二五”期间拟制（修）订标准总数达 185 项，其中国家标准计划 31 项；行业标准计划 154 项，涉及重点项目 66 项（电控燃油喷射系统项目由燃料喷射系统标委会另行安排，未计入）。“十二五”期间全国内燃机标准化技术委员会陆续完成了诸如中大功率燃气发动机、SCR 系统、EGR 系统、NVH 等一批标准，涉及内燃机节能减排、替代能源、排放后处理、再制造等新兴产业领域标准和安全，噪声振动、可靠性、关键零部件等传统领域标准的制（修）订，保障内燃机安全、节能减排目标的实现，也提升了标准的先进性、适应性，适应产品升级、行业结构调整和优化发展。截至 2014 年年底，在研标准计划 148 项，其中在研国家标准计划 22 项，行业标准计划 126 项。

2.4.1 汽车发动机领域技术标准体系现状

截至 2014 年年底，属于汽车发动机领域技术标准共计 170 项，其中国家标准 105 项、行业标准 65 项，具体见表 2-9 所示，其体系框架如图 2-6 所示。

表 2-9 全国汽车标准化技术委员会发动机分技术委员会负责归口的标准

标准类型	国家标准			行业标准			总计
	强制性标准	推荐性标准	合计	强制性标准	推荐性标准	合计	
基础通用标准	0	32	32	0	4	4	36
产品标准	6	24	30	0	44	44	74
方法标准	12	31	43	0	17	17	60
管理标准	0	0	0	0	0	0	0
合计	18	87	105	0	65	65	170

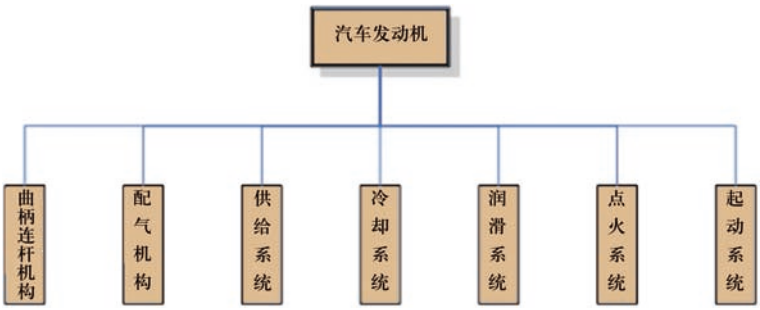


图 2-6　汽车发动机领域技术标准体系框架图

1. 汽车发动机领域国内现有标准的水平及竞争力

目前发动机领域的 170 项标准中有 40.6%（69 项）是转化国外标准而来，其余标准根据汽车发动机行业需要进行制（修）订，标准整体水平与国外相比还存在一定的差距。近年来因我国汽车市场的迅速发展，产量已经跃居世界第一，因汽车数量增加带来的空气污染和能源消耗日益加剧，国家节能减排的任务艰巨，国内发动机领域应加紧有关节能环保技术标准的制定，为国家节能减排保驾护航。

2. 汽车发动机领域国内现有标准的协调性及配套性

发动机领域的标准数量有 170 项，其中有在全国汽车标准化技术委员会归口，也有在其他标委会和国家环保部归口的标准，在全国汽车标准化技术委员会归口的标准有 50 项左右，涉及到发动机整机及零部件的标准基本覆盖完整，可能存在零部件标准因非归口在汽标委且标准的技术内容也并非仅针对汽车发动机，对汽车发动机企业指导作用不强，针对此情况发动机分标委今后将对以上标准进行分批逐次核查，针对不适合汽车发动机的标准将联合国内发动机及零部件厂家开展相关标准的制（修）订工作。

3. 汽车发动机领域现有国内标准的不足之处

目前汽车发动机新技术不断发展，且部分国内合资企业凭借先进的技术抢占市场，自主品牌发动机的水平相比合资企业有一定差距，在汽油机的涡轮增压及缸内直喷等先进技术以及柴油机的共轨和排放控制技术领域欠缺相应的先进标准，发动机分标委未来将争取国内掌握先进技术的企业对先进技术标准开展研讨制定工作，为民族汽车业发展做出贡献。

2.4.2　优化标准体系

根据（国办发〔2013〕12 号）文《国务院办公厅关于加强内燃机工业节能减排的意见》要求，内燃机领域标准工作将重点加强对有关内燃机节能减排的标

准体系建设和相关标准的制（修）订工作，同时跟踪现有标准体系中采用国际标准的动态，及时对国内的标准进行复审修订工作，紧跟国际标准的步伐，完善内燃机标准体系。优化内燃机标准体系总体思路是加强强制性标准管理，改进推荐性标准体系，培育发展团体标准，放开搞活企业标准，完善科学合理、运行高效的标准管理机制。今后的主要工作围绕以下方面开展。

1） 整合精简强制性标准。做好内燃机领域强制性国家标准和计划项目清理评估，把强制性标准范围严格限定在安全、环保（噪声、振动、排放等）、节能（能效等级和评价、燃料经济性等）基本要求之内。对不再适用的强制性标准予以废止，对不宜强制的转化为推荐性标准。

2）调整优化推荐性标准。推荐性国家标准重点制定内燃机基础通用、与强制性国家标准配套的标准；推荐性行业标准重点制定内燃机领域的重要产品、服务和行业管理标准，如替代燃料发动机（包括燃气及混合动力）及关键零部件、整机及零部件再制造、内燃机排放控制和后处理系统、电控燃油喷射系统、关键零部件（高效涡轮增压、先进过滤和冷却系统）、整机及关键部件系统智能化、模块化、可靠性和失效分析等标准。

3）实现标准体系维护常态化。把内燃机标准体系表的修订工作纳入年度标准化工作议程，及时更新、补充、完善内燃机工业标准体系，提升标准体系与产业发展需求的贴合度。

4）改革企业产品标准备案制度，建立企业产品和服务标准自我声明公开和监督制度，落实企业主体责任。

5）加强内燃机标准制（修）订管理，完善制定程序，保证制定过程公开透明。优化标准审批流程，落实标准复审要求，缩短制定周期，加快更新速度。加强标准与科技互动支撑，建立应用科技报告制度促进科技成果转化为标准的工作机制。通过国家科技计划、专项支持标准研制。将形成技术标准作为相关科研项目的重要考核指标之一和专业技术资格评审依据。

第 3 章

国际先进水平及发展趋势

经过一百多年的发展，欧美等发达国家内燃机技术相当成熟，已成为全球内燃机行业的标杆。面对世界能源消耗和环境保护新的挑战，欧洲、东亚的日本和韩国、美国等发达国家和地区，纷纷对以内燃机为配套动力的装置提出了控制有害气体排放的严格法规要求，并针对控制 CO_2 排放的问题，提出了降低燃油消耗的阶段目标。节油就是节能，这已成为全球汽车和内燃机产业应对气候变暖、实现可持续发展的国际共识。严格的节能减排法规，已成为内燃机节能减排新技术创新和应用的驱动力。

3.1 主要先进国家内燃机产业的发展历程和特点

内燃机作为汽车的动力伴随着汽车工业的发展而发展。汽车成为内燃机的最主要用途，车用内燃机的技术发展也引导着内燃机技术发展的主要方向。在内燃机工业发展的初期，人们对内燃机仅关注其可靠性和动力性。汽车增长所带来的都市空气污染问题，在 20 世纪 50 年代初首先在美国洛杉矶引起了关注。最早的汽车排放法规诞生于美国加利福尼亚州，并迅速扩展到整个美国。

欧洲从 20 世纪 70 年代开始制定汽油车的排放法规，80 年代开始制定柴油车的排放法规。90 年代以来，城市环境污染问题愈加严重，成为政治家关注的主要议题之一。1993 年陆续开始实施欧Ⅰ到欧Ⅵ排放法规，同时加快降低对 HC、CO 及 NO_X 和 PM 等排气污染物排放限值。21 世纪开始，还对温室气体 CO_2 的排放进行了限制。

20 世纪 70 年代的石油危机，促进了内燃机节能技术的进步。虽然，石油危机没有持续下去，但是，消耗全球能源一半以上的内燃机所排出的 CO_2，对造成全球气候变暖的温室效应，起到了不可推卸的责任。

节能减排是目前驱动内燃机技术发展的主要推动力。美国是世界上汽车和内燃机最大的市场之一，也是最早实施排放标准的国家。21 世纪初，为应对严格的排放法规标准，美国的发动机公司纷纷采用新技术，使产品满足排放法规要求，从而使公司获得了很好的发展，但是，也有一些公司因技术路线选择错误，导致载货汽车市场份额下降甚至退出市场。

日本汽车工业开始得较晚， 20 世纪 60 年代日本汽车工业高速发展，1967 年日本超过德国而成为第二大汽车生产国，国内汽车销量首次超过百万辆。1970

年，日本国内汽车销量达到 238 万辆，千人平均保有量达到 170 辆。20 世纪 70 年代的石油危机给日本的汽车产业带来了极大的发展机遇，日本的小排量汽车被推上了世界汽车的舞台。在欧洲注重节能减排之后，日本车又进一步抓住了欧洲市场，一跃成为世界汽车工业的巨头。1976 年，日本汽车出口达到 250 万辆之多，首次超过国内销量。

自 20 世纪 90 年代末以来，日本汽车工业进行了大幅度的兼并重组，加大了新技术在汽车和内燃机上的应用。日本汽车的总体特色是注重经济实用，追求良好的性价比，由于坚持采用低油耗的造车理念，使得日本汽车在节能降耗方面优于欧美。在日本汽车工业的发展过程中，内燃机工业的节能减排起到了关键的作用。

韩国汽车工业从无到有，仅用不到 50 年时间就走完了发达国家百余年的历程，并成为当今世界汽车生产大国，已经成为世界第五大汽车制造国，第六大汽车出口国。20 世纪 70 年代后，韩国政府实行“汽车国产化”政策，各汽车公司开始大规模引进国外生产技术， 2013 年韩国汽车工业乘用车产量 412 万辆，商用车产量 39 万辆，成为世界主要的汽车制造强国之一。

3.2 主要先进国家内燃机产业的技术水平和规模

3.2.1 主要先进国家内燃机产业概况

1. 美国内燃机产业概况

（1）美国是内燃机生产制造大国和强国　美国目前汽车保有量 3 亿多辆，拥有全球最发达的高速公路网，公路运输是美国最主要的交通方式。美国高效的工农业生产方式完全依靠于先进的机械化设备的支撑，内燃机作为上述装置的配套动力，市场需求量非常可观。内燃机的产销量长期居于全球领先的地位，是最重要的内燃机工业大国。

美国也是一个内燃机工业强国。由于政府制定了世界上最严格的有害物排放法规和可靠性要求，规定了最严格的在线检测系统（OBD），因此在美国市场销售的内燃机产品技术指标在很多方面均属世界最高水平。美国内燃机技术水平、研发实力、加工制造、零部件供应等均在世界上处于领先地位。

美国的内燃机产品覆盖轿车、轻型货车、中重型货车、大客车、工程机械、船舶和发电等领域。在轿车和轻型货车用内燃机产品领域，美国的主要内燃机生产企业有：美国的通用（GM）、福特（Ford）和克莱斯勒（Chrysler）三大汽车公司，日本的本田（Honda）、日产（Nissan）和丰田（Toyota）三大汽车公司，

韩国的现代（Hyundai）和起亚（Kia）汽车公司，德国的大众（VW）汽车公司。2013 年，美国生产了 1 080 万辆轿车和轻型货车，其中美国福特和通用公司各占 20% 左右的市场份额，为美国轻型车用内燃机产量最大的企业；美国三大汽车公司的产量占据轻型车产量的一半以上；日本汽车企业的产量占据了美国轻型车产量的 30%；韩国汽车企业的产量占美国轻型车产量的 7%。这些汽车所需的内燃机均由汽车企业自己生产提供。

在中重型载货汽车和客车领域，美国的生产厂家多、生产规模大。美国载货汽车按载重量分为 8 级，第 1、2 级为皮卡、小型货车、SUV 等轻型载货汽车，第 7、8 级为大型集装箱运输车、大型城市公交车、混凝土搅拌车等重型载货汽车。根据 2013 年统计资料，美国第 5 ～ 7 级中重型载货汽车的年销量分别为 4 万～ 5 万辆，主要生产企业为福特、福莱纳（Freightliner）和万国（International）公司；而第 8 级重型载货汽车的销量达到 18 万辆，主要生产企业为福莱纳、万国、肯沃斯（Kenworth）和皮特比尔特（Peterbilt）等公司，其中福莱纳公司的重型载货汽车产量占据 1/3 以上的市场份额；第 3 级中型载货汽车年产量为 25 万辆，主要生产企业是克莱斯勒、福特和通用三大汽车公司。

美国中重型载货汽车用柴油机并不完全由载货汽车企业自己生产，而是由一些柴油机专业生产厂商供给。根据 2013 年美国主要重型载货汽车生产企业与柴油机生产企业的供应关系统计结果，除日本日野（Hino）汽车公司的柴油机完全由自己企业生产以外，几个主要的重型载货汽车生产企业的柴油机均由康明斯（Cummins）、底特律柴油机（Detroit Diesel）、纳威斯达（Navistar）、马克（Mack）、佩卡（PACCAR）等柴油机制造商提供，其中康明斯公司是最大的柴油机供应商，几乎为所有的中重型载货汽车和大客车生产商提供柴油机，2013 年占据了重型载货汽车柴油机市场供应的 47%。

在农业、建筑、工程、矿山、发电、除草等非道路用内燃机领域，美国也有非常强的生产和研发能力。美国非道路内燃机按照单机功率分为小型、中型和大型三级，单机功率小于 70 马力（即 51.5kW）的内燃机称为小型内燃机，单机功率大于 600 马力（即 441kW）的内燃机称为大型内燃机。美国每年生产非道路内燃机约为 40 万台，绝大多数机型为大中型内燃机；小型内燃机则需要从日本、欧洲和中国进口，年需要量为 60 万台左右。美国康明斯、卡特彼勒（Caterpillar）和约翰迪尔（John Deere）公司是最重要的非道路用内燃机生产商，其产品总功率占据美国非道路内燃机市场需求的 60% 以上。

（2）美国主要柴油机生产企业　康明斯公司是全球最大的柴油机、燃气发动机、发电机组及其相关零部件生产企业，内燃机产品功率从 60 马力（44kW）覆盖到 3 500 马力（2 570kW），为全球许多重型车辆生产商和机械设备生产商供应发动机。公司创建于 1938 年，目前已经在世界 70 多个国家中的 300 多个地区建立了 15 个独资生产企业、17 个合资生产企业及 500 多个供应服务中心。

卡特彼勒公司是全球最大的工程机械和矿山设备生产商，成立于 1905 年。1997 年收购了英国珀金斯（Perkins）柴油机公司和美国的马克（Mack）发动机公司，前者以高速柴油机生产为主，后者以中低速船舶和发电柴油机为主，使得卡特彼勒公司成为世界领先的柴油发动机制造商，产品功率从 5kW 覆盖到 16 000kW，几乎满足所有工程设备的需求。

约翰迪尔（John Deere）公司是全球最大的农业机械制造商和相应内燃机生产商，成立于 1837 年，从一个铁匠铺发展成为世界 500 强企业之一，目前在全球 160 多个国家拥有业务合作，雇员达到 37 000 人。

2. 欧洲内燃机产业概况

欧洲是近代工业革命的发源地，也是内燃机工业发展的摇篮，其产业规模和技术水平一直走在世界的前列，德国、法国、英国、意大利、西班牙、瑞典、荷兰等都有很强的内燃机工业生产实力。

（1）车用内燃机概况　内燃机是各种车辆的动力源，所以内燃机工业与汽车工业有密不可分的关系。欧盟 28 国的轿车产量在 2007 年达到最高值，为 1 560 万辆；随后由于金融危机的影响，从 2008 年开始轿车产量一直下降，至 2013 年轿车产量降为 1 200 万辆；西班牙和意大利是受金融危机影响最大的国家，轿车产量显著萎缩。德国是欧洲轿车产量最多的国家，占欧洲产量的三分之一左右，其次是英国、法国和意大利，四个国家的轿车产量占欧洲轿车产量的 70%。

根据 2013 年汽车统计资料，2013 年，德国大众汽车公司的产量占欧盟市场份额最高，约为 12%；其次是福特（欧洲）汽车公司（主要研发在英国进行），约为 9%。德国几大汽车公司（大众、宝马、奥迪、奔驰）的轿车总产量几乎占欧盟轿车市场的 1/3，法国三大汽车公司（雷诺、标致和雪铁龙）的轿车总产量占欧盟轿车市场的 15%。在欧洲轿车市场中有近 40% 的轿车来自于欧洲以外的汽车公司在欧洲生产的轿车，例如日本丰田、日产和本田公司都在英国建有大型的轿车生产基地。2013 年统计结果还表明，大众 Golf、福特 Fiesta、雷诺 Clio、

大众 Polo 是欧洲销售量最大的车型。欧洲这些轿车生产企业建有自己的发动机生产厂和发动机研发机构，满足轿车和发动机一体化开发需要。

在轻型载货汽车和小客车（载重量小于 3.5 吨）方面，2013 年欧盟 28 国的年产量为 135 万辆左右，法国、英国和德国是欧洲轻型载货汽车产量的前三名国家，占据欧盟年产量的 60% 以上，其中法国占据最大的市场份额，达 25%。从制造商年产量看，法国雷诺汽车公司的轻型车产量占欧盟最大的市场份额，约 15%；其余占据产量前列的制造商分别为法国雪铁龙、意大利菲亚特、法国标致、美国福特、德国大众和德国梅塞德斯—奔驰等汽车公司，这些公司生产的轻型车占欧洲 80% 的市场份额。

在重型载货汽车和大客车（载重量大于 3.5 吨）方面，2013 年欧盟 28 国重型载货汽车和大客车的年产量为 32 万辆左右，比 2008 年金融危机以前几乎下降了三分之一。德国、英国和法国位列年产量的前三名，占欧洲重型车辆年产量的 60%。产量最高的为德国，占欧洲重型车辆产量的四分之一以上。在欧洲重型车辆的产量中，载货量 16t 以上的重型载货汽车产量占重型车辆产量的 80%，这是因为欧洲 75% 的货物运输量（约 180 亿吨 / 年）需要通过重型载货汽车完成。欧洲的重型载货汽车和大客车的生产主要集中在五个企业集团：德国戴姆勒（Daimler）集团（主要生产企业为梅赛德斯公司）、德国大众集团（主要生产企业为曼（MAN）公司和斯堪尼亚（Scania）公司、瑞典沃尔沃（Volvo）集团和荷兰达富（DAF）集团。欧洲重型车辆几乎全部采用柴油机作为动力，有一些柴油机由重型载货汽车生产企业自己提供，有一些柴油机由专业柴油机生产企业（如康明斯等）提供。

（2）非道路用内燃机概况　在非道路内燃机工业方面，欧洲具有悠久的历史和实力。目前欧洲著名的内燃机生产企业有：德国曼（MAN）、道依茨（Deutz）、MTU 公司和英国的珀金斯（Perkins）公司。德国曼公司成立于 1758 年，是欧洲第三大重型载货汽车和大客车生产商，以及重要的柴油机和涡轮机生产厂商。1897 年该公司著名工程师鲁道夫—狄赛尔研制成功了世界上第一台柴油机。1991 年接管了奥地利斯太尔卡车商用车股份公司，2006 年收购了瑞典斯堪尼亚卡车和客车公司（Scania AB），成为大众汽车集团控股的重型车辆和柴油机生产商。

德国道依茨公司是世界上第一个内燃机生产企业，主要生产柴油机和燃气发动机，用于商用车辆、工程机械、发电站、农业机械、铁路机车、船舶和军用车辆。

该公司于 1864 年创建，1876 年创始人之一奥拓（N.A.Otto）发明了世界上第一台四冲程内燃机，为世界内燃机的开发和生产奠定了基础。该公司目前在德国建有 4 个发动机生产厂，在全球拥有 17 个许可证和合作厂、22 个子公司、18 个服务中心和 14 个办事处，在 130 个国家建立了 800 多家服务合作伙伴。

德国 MTU 公司是世界领先的柴油机和燃气发动机制造商，其柴油机功率从 35kW 到 9 000kW，广泛用于重型车辆、工程机械、舰船、发电和铁路机车。公司成立于 1899 年，1960 年被梅赛德斯—奔驰公司收购，因此并入了戴姆勒集团。2000 年 MTU 公司与美国军用柴油机最大的供应商 —— 底特律柴油机公司合并，开发了一些功率密度大、热效率高、体积小、可靠性高的柴油机型（如 4000 系列、890 系列等），成为世界上最重要的主战坦克动力。

英国珀金斯（Perkins）公司是世界领先的非道路柴油机和燃气发动机生产商，成立于 1932 年。发动机功率覆盖范围为 4 ～ 2 000kW，主要用于农业机械、建筑机械、工程机械、发电设备等。在英国、美国、巴西和中国建有生产厂，向全球 1 000 多家工农业设备生产商供应发动机，年产量达 80 万台。从建厂到现在，已经累计生产了 2 000 万台发动机，其中 450 万台仍然在使用中。1998 年成为美国卡特彼勒公司旗下的全资子公司。

3. 日本和韩国内燃机产业概况

日本内燃机绝大多数应用于乘用车、轻型载货汽车和客车，因此日本内燃机产业的发展与其汽车工业的发展密不可分。

（1） 日本内燃机产业发展历程　日本汽车工业在第二次世界大战之前就有了一定的发展，第二次世界大战以后随着日本经济的十年复苏和随后的经济起飞，其汽车工业从 20 世纪 60 年代开始高速发展，汽车产量从 1960 年的 16 万辆猛增到 1967 年的 300 万辆，超过德国成为世界第二大汽车生产国。20 世纪 70 年代的石油危机，让欧美政府和广大的汽车消费者开始关注燃油成本，以小排量、低油耗为主要特点的日本汽车企业抓住机遇，通过扩大出口和在欧美建立汽车厂等方式，进军欧美汽车市场，一跃成为世界汽车工业的巨头。1976 年日本汽车出口已达 250 万辆之多，1980 年日本汽车产量首次突破 1 000 万辆大关，1990 年汽车产量达到历史的巅峰，达到 1 350 万辆。此后，由于日美贸易摩擦、日元升值等因素，日本汽车产量回落，到 1994 年汽车产量落后于美国，退居世界第二。

在 20 世纪 90 年代日本经济泡沫破裂后，其汽车工业进行了大幅度的兼并重组和技术革新，进一步强化了国际化发展道路。从 1998 年到 2001 年，丰田公司

控股了大发和日野，美国福特公司控股马自达（Mazda），戴姆勒—克莱斯勒公司控股了三菱（Mitsubishi）汽车，法国雷诺控股了日产汽车和日产柴油机，美国通用控股了铃木（Suzuki）、五十铃（Isuzu）和富士重工。但是，在 2005 年以后，欧美汽车集团又陆续卖出或减持日本汽车企业的股份，如戴姆勒—克莱斯勒公司卖出了三菱公司的全部股份，雷诺公司卖出了日产柴油机的全部股份，通用公司卖出了富士重工和五十铃的全部股份、减持了铃木股份，福特公司减持了马自达股份。沃尔沃公司陆续从日产手中购得日产柴油机的全部股权。

（2）日本内燃机生产企业　目前，日本主要的汽车生产商有：丰田、日产、本田、马自达、三菱、铃木、大发、斯巴鲁、雷克萨斯等，其中丰田、日产、本田和铃木进入了世界前 10 强汽车生产企业之列。这些汽车公司在全球许多国家建立独资或合资的汽车生产厂，进行国际化发展。2013 年，丰田、日产、本田、铃木和马自达公司的全球产量总计分别为 1 032 万辆、495 万辆、430 万辆、284 万辆和 126 万辆。2013 年在日本本土销售的汽车为 326 万辆（不包括微型汽车），其中乘用车约 287 万辆，客车 1.12 万辆，载货汽车 37.9 万辆。

日本主要的中重型载货汽车和客车生产企业有：丰田、日产、五十铃、日野、三菱等汽车公司。在非道路用内燃机方面，久保田（Kubota）、洋马（Yanmar）、小松制作所（Komatsu）、五十铃（Isuzu）等公司生产了大量的中小型汽油机和柴油机，广泛用于摩托车、三轮车、割草机、发电机、农业设备、工程机械等，在世界享有盛誉；三菱重工、川崎重工和富士重工则是日本最重要的中重型内燃动力生产商，主要为重型车辆、舰船、工程机械、机车、军用装备等提供动力，是日本重要的军工企业。日本的造船业也十分发达，平均年产低速船用发动机约 400 台，总功率达 810 万马力（595 万 kW）。

（3）韩国内燃机产业发展历程概况　韩国内燃机工业随着其汽车工业的发展而飞速发展，用不到 60 年时间就走完了发达国家百余年的历程，一跃成为世界第五大汽车制造国和第六大汽车出口国。

韩国最早从事汽车生产的公司是起亚汽车公司，创建于 1944 年 12 月，主要是以利用外资的方式，向国外公司购买技术进行生产活动。20 世纪 70 年代后，韩国政府实行“汽车国产化”政策，各汽车公司开始大规模引进国外生产技术，使韩国的汽车工业获得了飞速发展。20 世纪 80 年代以后，汽车产量开始快速增长，1985 年达到 37 万辆，1986 年猛增到 60 万辆，1989 年达到 113 万辆，1990 年达到 132 万辆，2000 年突破 300 万辆，并形成了现代、起亚、大宇、双龙四大汽

车公司鼎足的格局。同时，从1987年开始，韩国汽车工业加快了国际化发展步伐，在美国、欧洲、中国和印度等国家建立生产基地，产品远销全球五大洲。到1995年，韩国汽车出口已达到110万辆，出口量在全球排名第六位，汽车产量为亚太地区第二位（仅次于日本）。

1997年的亚洲金融危机重创了韩国的汽车工业，在其后几年，韩国汽车工业被迫兼并和重组，并允许外国资本大规模进入，使韩国汽车生产资源更加集中和国际化。其中，曾经收购双龙、三星和起亚的韩国第二大汽车公司——大宇汽车宣布破产，最终被美国通用汽车公司所收购；三星汽车被法国雷诺汽车公司收购；双龙汽车于2004年被我国上汽集团控股（后于2009年减持股份）。目前韩国的五大车企分别为：现代汽车、起亚汽车、通用韩国汽车、双龙汽车和雷诺三星汽车。在韩国汽车工业的发展过程中，政府起到了重要作用。政府要求各厂家不要采用外国汽车公司的许可证进行生产，应独立设计车型；1974年，韩国政府提出长期振兴计划，要求生产出完全的国产化汽车；要求提高汽车生产能力，特别是汽车零部件生产能力；要求各汽车企业不遗余力地培育自主创新能力；还制定了严格的限制外部投资的措施，以保护本国汽车工业的自主发展。

2014年，韩国五大汽车公司在全球销售汽车895万辆（包括乘用车、轻型载货汽车和客车），在韩国本土销售145万辆，海外市场的销量达到750万辆。五大汽车公司中，现代汽车是世界十强汽车企业之一，2014年在全球销售汽车496万辆；起亚汽车的销量为304万辆，通用韩国的销量为63万辆，雷诺三星的销量为17万辆，双龙汽车的销量为14万辆。

在非道路内燃机工业方面，现代（Hyundai）集团旗下的现代重工是世界著名的造船公司，生产中低速船用发动机，为韩国海军舰船装备的发展做出了重要贡献。韩国斗山（Doosan）集团旗下的斗山发动机公司是世界著名的柴油机和燃气发动机生产企业，产品主要用于船舶、发电机组、挖掘机、装载机等。

4. 各国内燃机产业和产品情况对比

（1）规模对比　2014年世界汽车总产量为9 060万辆，其中轿车总产量为7 230万辆，轻型和重型商用车的产量为1 833万辆。图3-1显示世界汽车总产量在主要地区的分布，由图可见，中国、欧洲（欧盟28国）、北美和日韩分别位列世界汽车总产量的前4位，占世界汽车总产量的85%。

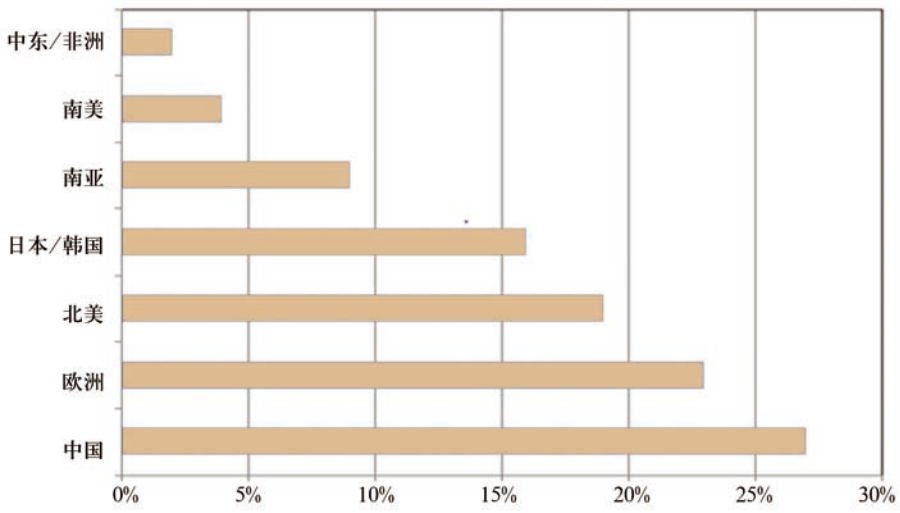


图 3-1　2014 年世界各地区汽车总产量分布

表 3-1 表示 2013 年世界主要汽车生产商的产量。可见，日本丰田、美国通用和德国大众汽车公司位列世界汽车产量前 3 位，产量分别为 1 032 万辆、963 万辆和 938 万辆。在世界汽车产量前 16 强中，美国有通用和福特两个汽车公司入榜，日本有丰田、日产、本田、铃木、马自达五个汽车公司上榜，德国有大众、宝马、戴姆勒三个汽车公司上榜，法国有标致—雪铁龙、雷诺两个汽车公司上榜。此外，意大利菲亚特、韩国现代、中国上汽和东风汽车公司上榜。

表 3-1　2013 年世界主要汽车生产商产量对比　（单位：辆）

序号	制造商	产量	乘用车	轻型商用车	重型商用车	客车
	总计	86 514 075	68 582 410	14 510 167	3 158 513	262 985
1	丰田	10 324 995	8 565 176	1 481 722	272 411	5 686
2	通用	9 628 912	6 733 192	2 890 958	4 762	
3	大众	9 379 229	9 259 506	119 723		
4	现代	7 233 080	6 909 194	242 021	67 290	14 575
5	福特	6 077 126	3 317 048	2 667 220	92 858	
6	日产	4 950 924	4 090 677	837 331	22 916	
7	菲亚特	4 681 704	2 163 040	2 350 697	124 131	43 836
8	本田	4 298 390	4 263 239	35 151		

（续）

序号	制造商	产量	乘用车	轻型商用车	重型商用车	客车
9	铃木	2 842 133	2 452 573	389 560		
10	标致—雪铁龙	2 833 781	2 445 889	387 892		
11	雷诺	2 704 675	2 347 913	356 762		
12	宝马	2 006 366	2 006 366			
13	上汽	1 992 250	1 685 392	231 374	74 431	1 053
14	戴姆勒	1 781 507	1 631 502	150 005		
15	马自达	1 264 173	1 175 443	88 730		
16	东风	1 238 948	642 092	226 319	357 414	13 123

在载质量 4.5t 以上的中重型载货汽车和大客车生产规模上，2012 年欧洲生产了 30.7 万辆、美国生产了 55.1 万辆、中国生产了 116.9 万辆。

在非道路内燃机产业方面，美国拥有康明斯、卡特彼勒、约翰迪尔等世界领先的柴油机和燃气发动机制造商，德国拥有曼、道依茨、MTU 等世界领先的内燃机制造商，显示出非常强的内燃机工业实力。日本拥有久保田、洋马、小松、五十铃等公司，在中小型内燃机产业上领先于世界。

在中低速船舶用柴油机生产领域，总部位于芬兰的瓦锡兰（wärtsilä）公司和德国的曼公司是世界最大的制造商。2012 年世界中低速船舶柴油机的生产量为4 950 万 kW，其中瓦锡兰公司和曼公司在中速柴油机市场上共占据 70% 的份额，在低速船用柴油机市场上共占据 90% 的份额。美国卡特彼勒公司和日本三菱重工在中速和低速柴油机上分别占有 5% 和 2% 的市场份额。

（2）产品品种对比　由于世界各国的工业基础、石油供给、排放法规、油耗法规、自然资源等差异，世界各国在内燃机动力发展上呈现了不同的特点。图 3-2 表示 2013 年世界主要国家在轿车和轻型载货汽车上所采用的动力类型。由图可见，在轿车和轻型货车市场上美国几乎全部采用汽油机为动力，其柴油机的使用率不足 2%。主要原因是美国的油价非常便宜，美国的客户认为柴油机成本高、噪声大、不清洁、冷起动困难等。近年来，随着美国汽车油耗法规的推动、柴油燃料含硫量的降低以及柴油机产品技术和供应链的成熟，欧洲一些汽车公司（特别是大众汽车公司）开始在美国推行更加节油的柴油机轿车，2014 年已经有 7 家汽车公司的 24 款新车型采用了柴油机，预计到 2018 年轿车和轻型货车用

柴油机的市场占有率将提高到 10%。值得一提的是，近年来美国混合动力轿车的发展比柴油机轿车要好，经过丰田、本田和日产等日本汽车公司的推广，以及通用、福特等美国汽车公司对混合动力的开发，到 2013 年美国混合动力轿车已经在新推出的车型中占 4.5% 的份额。

与美国相似，中国的轿车和轻型车辆几乎全部采用汽油机，柴油机的占有率不足 1%。尽管欧洲一些汽车公司（如大众）极力在中国推广柴油机轿车技术，但由于柴油品质和柴油机高成本的原因，收效甚微。在中国政府“节能减排”政策的大力支持下，混合动力汽车和纯电动汽车得到一定的发展，但由于成本高、一次充电的行驶距离短、配套充电站少等问题，到 2013 年 , 混合动力汽车和电动汽车产品仍然仅占轿车市场 0.2% 的份额。但是值得一提的是，由于天然气价格便宜，天然气发动机在我国出租汽车上得到比较广泛的应用。

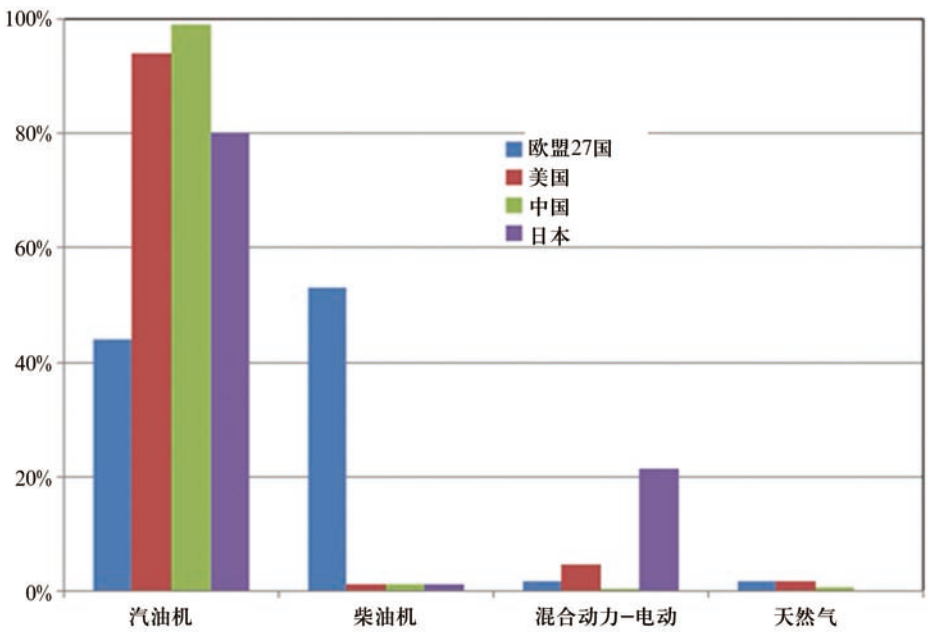


图 3-2　2013 年主要国家轿车和轻型载货汽车用动力类型分布

同中国和美国相似，日本在轿车和轻型车辆产品上也流行汽油机，很少用柴油机。近年来日本政府推动“节能减排”政策，对低油耗汽车给予税收优惠，因此，日本各大汽车公司纷纷开发低油耗的微型汽车，广大汽车消费者也踊跃购买微型轿车，2013 年排量在 0.6L 左右的微型轿车的销量为 211 万辆，创历史新高。2013 年日本最畅销的 10 款新车型中有 7 款为微型轿车，另外 3 款为混合动力车型，

它们分别是丰田的混合动力车型 AQUA 和 Prius 及本田的混合动力车型 FIT。自从丰田汽车公司 1997 年开发成功世界上第一台混合动力轿车 ——Prius 以来，作为节能产品的混合动力技术在日本得到很大的发展，丰田、日产、本田等汽车公司纷纷开发混合动力汽车产品，使得混合动力产品的市场占比也大幅度提高，到 2013 年日本新开发的轿车产品中已有 20% 采用混合动力。总之，在日本，微型汽车和混合动力汽车凭借低油耗的优势和低税收政策的支持，正在广大消费者中得到全面普及，与美国、中国、韩国等消费者偏爱油耗较高的大中型汽车形成了鲜明的对比。

欧洲在轿车和轻型载货汽车动力方面采取了与前三个国家完全不同的道路，它并没有完全采用成本较低的汽油机产品，相反其柴油机的应用已经占到一半，2013 年达到 53%。这主要是因为，欧洲非常注重汽车燃油消耗的控制，制定了世界上最严格的 CO_2 排放法规，而柴油机的燃油消耗比汽油机低 20% ～ 30%，因此受到欧洲汽车生产厂商的欢迎；再者，欧洲的柴油质量好、价格低于汽油，税收政策鼓励低油耗的柴油机的发展；此外，由于柴油车的开发在欧洲具有比较长的历史，围绕柴油机的研发、生产、零部件供应、市场服务等产业链相当完善，柴油机的开发和使用成本得到了有效的控制。在混合动力方面，虽然在欧洲的日本汽车公司大力开发混合动力轿车产品，欧美汽车公司也纷纷推出了混合动力新车型，但截至 2013 年，混合动力汽车在欧洲轿车产品中的比例仍然不足 2%。

欧洲在不同级别轿车上柴油机的应用比例并不相同。在中大型轿车、商务车、SUV 车型中柴油机的应用比例达 60% ～ 70%，而在小型轿车上的应用不到 30%，在微型轿车上的应用很少，仍然采用汽油机。统计资料表明，在 2012 年以前的十年中，柴油轿车的比例一直稳步增加，但是在 2012 年之后，柴油机的市场占比有所下降。这是因为随着更严苛的欧Ⅵ排放法规的实施，柴油轿车在进一步降低 NO_X 方面不仅需要提高喷油压力，增加了喷油系统的成本，而且需要增加选择性催化反应器（SCR）或者稀燃 NO_X 捕获器（LNT），增加了排气后处理系统的成本，因此，柴油轿车的节油收益和成本损耗的平衡优势受到一定的挑战。

在中重型载货汽车和大客车领域，欧洲几乎全部采用柴油机，而美国就不同了。根据 2013 年统计结果，美国第 3、第 4 和第 7 级中重型载货汽车中只有 40% 左右的车型采用柴油机为动力，第 5 级重型载货汽车中柴油机的应用率约为 80%，第 6 级重型载货汽车中 90% 以上采用柴油机，第 8 级重型载货汽车几乎全部采用柴油机。整个中重型载货汽车和大客车市场中柴油机的使用率平均为

70% 左右。

5. 内燃机产业国际化发展概况

发达国家的内燃机和汽车工业经历了一百多年发展，特别是西方自由经济兴衰历程的洗礼，内燃机和汽车工业从主机厂到零部件供应商都进行了深刻的国际化发展。

首先，内燃机和汽车的生产企业进行了深刻的发展、衰落、并购、重组、再发展等一系列市场化过程，形成了一些很大的集团公司，这些集团公司在世界各国投资建厂，形成了跨国集团公司。同时这些集团公司相互之间进行技术、平台、融资、服务等方面的合作，以共同抵御经济的动荡，共同获得最大的经济效益。无论是大众、通用、福特、丰田、日产、戴姆勒、雷诺等汽车和内燃机制造企业，还是康明斯、卡特彼勒、道依茨、瓦锡兰、曼等内燃机制造企业，都已经在世界多个国家建厂或参股，进行生产和销售活动。下面通过丰田汽车公司和康明斯发动机公司的发展历程了解内燃机和汽车产业的国际化发展趋势。

日本丰田汽车公司是世界最大的汽车公司之一，其生产活动已经遍及世界各地，多款车型在美国、欧洲和亚洲畅销，其发展中充满了国际化的历程。表 3-2 给出了近年来丰田汽车公司在股权、合资、零部件采购、市场配置、技术、生产等方面的主要国际化活动。

表 3-2　丰田汽车公司近年来主要的国际化活动

合作公司	股权安排	合资企业	供应采购	市场资源配置	技术设计	生产组装	备注
宝马、福特、戴姆勒、通用、本田、大众					√		清洁能源合作关系伙伴
德国宝马			√		√		合作开发一款运动型汽车平台；为丰田欧洲提供柴油机
中国华晨						√	在华晨生产丰田微型面包车
日本大发	√	√	√	√	√	√	丰田控股大发；一起开发零部件和汽车；为大发公司在巴基斯坦和委内瑞拉生产汽车
中国一汽	√	√		√		√	在亚洲进行三个合股投资；在中国生产发动机
日本富士重工	√				√	√	增持富士重工股份；双方合作开发斯巴鲁 BRZ 和塞恩 FR-S 车型；在印第安纳斯巴鲁汽车公司生产丰田汽车

（续）

合作公司	股权安排	合资企业	供应采购	市场资源配置	技术设计	生产组装	备注
中国广汽		√				√	与广汽合资生产丰田汽车
日本五十铃	√				√		增持五十铃股份；双方在发动机动力方面展开技术合作
日本马自达			√		√		许可同意马自达采用丰田混合动力协同驱动系统
法国标致		√		√		√	双方合资在捷克生产汽车；标致提供轻型货车给丰田，并更换商标在欧洲销售
法国雷诺		√				√	丰田、雷诺和三井合资哥伦比亚 Sofasa 汽车公司
美国特斯拉					√		特斯拉为丰田 RAV4 EV 电动车开发电池组件和动力系统

表 3-3 为美国康明斯公司在世界不同国家建立的合资或独资生产厂。从康明斯公司于 1956 年在英国建立第一个海外生产厂以来，已经在英国、中国、印度等世界 8 个国家 25 个地区建立了生产基地，拥有 17 个研发机构和 340 多个测试实验室，形成了国际化研发和生产网络，生产产量超过 95 万台，其中 50% 的产量在美国以外的工厂完成。

表 3-3 康明斯公司在世界各国的生产厂分布

国 家	公司名称	主要厂地址
美国	联合柴油机公司、康明斯工业中心、康明斯小松发动机公司、康明斯海洋公司、康明斯天然气发动机公司、Jamestown 发动机厂、康明斯发电机公司、哥伦布发动机厂	Charleston, Columbus, Cookeville, Fridley, Jamestown, Rocky Mount, Seymour, Stoughton
英国	Darlington 发动机厂、Daventry 发动机厂、康明斯发电机公司等	Darlington,Daventry,Huddersfield, Ramsgate, Stamford
法国	康明斯法国公司	Quimper
中国	重庆康明斯发动机公司、东风康明斯公司、武汉康明斯公司、无锡康明斯公司	北京，重庆，武汉，无锡，襄樊
印度	印度康明斯公司、印度动力系统公司、Tata 康明斯公司等	Pune, Indore, Jamshedpur
日本	日本小松发动机公司	Oyama
巴西	巴西康明斯公司	Sao Paulo
墨西哥	墨西哥康明斯公司	San Luis Potosi

通过这些国际化的产业活动，内燃机和汽车工业在有些国家已经出现了完全不同的工业格局。德国和英国就是两个典型的例子。在德国已经形成了大众集团、戴姆勒集团、宝马集团等根植于本土的超大型跨国汽车工业集团，保持了曼、道依茨、MTU 等一批国际著名的内燃机生产企业和产品品牌，产业实力非常强大。而英国的内燃机和汽车工业几乎全部都被外国公司所并购或独资发展，失去了本土企业的招牌。例如英国沃克斯豪尔（Vauxhall）汽车公司早在 1925 年就被美国通用汽车公司收购；美国福特公司早在 1909 年开始就在英国建立独资的汽车生产厂，目前已经成为福特公司在欧洲最大的轿车和轻型载货汽车研发和生产基地；英国最早的汽车企业 —— 罗孚（Rover）汽车公司于 1992 年被德国宝马公司收购，其后于 2005 年被我国南京汽车集团收购，宝马公司开发的罗孚 75 轿车的全部知识产权和技术平台则被我国上汽集团购买；英国利兰（Leyland）汽车公司于 1977 年与日本本田汽车公司合作，生产本田汽车；捷豹和路虎（Jaguar & Land Rover）汽车公司于 2008 年由福特汽车公司转卖给了印度塔塔（Tata）集团；英国的豪华轿车品牌中，劳斯莱斯（Rolls-Royce）于 2003 年被宝马公司收购，宾利（Bentley）于 1998 年被德国大众汽车公司收购，奥斯顿·马丁（Aston Martin）于 2007 年由福特公司转卖给科威特商人，Mini 汽车于 1994 年被德国宝马公司收购。在非道路内燃机方面，英国珀金斯发动机公司于 1998 年被美国卡特彼勒集团收购，美国康明斯公司早在 1956 年开始在英国进行并购和独立建厂，目前建有 Darlington、Daventry 等几个生产基地。从表面上看，英国的内燃机和汽车工业衰弱了，其实不然，这种并购并不表明其产业活动减弱了，相反这些生产活动更加符合市场经济规律的需求。实际上，目前英国拥有福特、通用、丰田、本田、日产等公司独资的汽车和内燃机生产企业，那些被国外公司收购的企业（如捷豹—路虎、Mini、宾利、珀金斯等）的生产活动仍然十分活跃；英国政府对于这些“外国招牌”的企业同样给予政策、资金和技术的支持；此外，英国还拥有一大批内燃机零部件生产厂商以及强大的内燃机研发公司（如 Ricardo 咨询公司、Lotus 咨询公司等），其内燃机和汽车工业发展在欧洲仅次于德国和法国，豪华汽车生产仅次于德国。2013 年英国汽车年产量达 160 万辆，发动机年产量 260 万台，其中 80 万台为柴油机。

其次，内燃机产业国际化发展还表现在零部件供应链的国际化。内燃机由机体、缸盖、活塞、曲柄连杆、配气系统、点火系统、供油系统、增压系统、进排气系统、后处理系统、冷却系统、润滑系统、电控系统等组成，是非常复杂的动

力装置，需要大量的零部件供应。长期以来，市场形成了大量专门从事零部件生产的专业企业，这些专业零部件生产企业可以集中力量专门解决零部件的技术和加工问题，提高零部件技术水平和降低生产成本。同类专业零部件企业之间通过激烈的市场竞争、兼并和重组，形成了零部件生产巨头；这些零部件供应巨头向世界不同的内燃机生产企业提供零部件保障，不仅形成了国际化零部件供应网络，而且也使不同企业生产的内燃机产品具有某一些共同的特征。下面通过电控高压共轨燃油喷射系统供应商的发展说明零部件生产企业的国际化。

随着排放法规和油耗法规的日益严格，特别是发展到欧Ⅳ排放以后，柴油机的高效清洁燃烧需要一个喷油压力足够高（＞ 160MPa）、喷油压力不随发动机转速而变化、且能够多次喷油的电控高压共轨燃油喷射系统，而这样的供油系统对于研发、测试、电控、加工、批量生产的质量控制等提出了特别高的要求。目前世界上车用柴油机电控高压共轨燃油喷射系统的开发和生产主要集中到德国博世（Bosch）、美国德尔福（Delphi）、德国大陆（Continental）和日本电装（Denso）四家公司手中，世界上绝大多数柴油机生产商都需要从这四家公司中采购高压共轨燃油喷油系统，并与他们一起开展发动机燃烧和性能的标定工作，以满足发动机的动力性、燃油经济性和排放目标。这四家公司为了满足世界不同国家柴油机企业的供应需求，在世界各地建设了共轨燃油系统研发和生产基地，例如德国博世公司在全球建立了 227 个生产基地，其中 171 家在德国境外（在中国建有 47 家公司），2014 年销售收入达 490 亿欧元。此外，这个巨大的零部件生产企业每年在新产品开发上投入 30 亿欧元，极大地促进了电控高压共轨燃油喷射系统的技术进步。博世公司目前已经开发了以压电晶体为特点的第三代高压共轨燃油喷射系统，喷油压力高达 240MPa，可实现 7 次喷射，为柴油机满足欧Ⅵ排放标准做出了贡献。

第三，内燃机的研发活动也呈现出国际化的发展趋势。在先进国家内燃机工业体系中，除了各大汽车公司和内燃机企业成立的产品研发中心以外，还存在着像奥地利 AVL、德国 FEV 和 IAV、英国 Ricardo、美国西南研究院等这样的技术咨询机构，他们研究内燃机技术、收集内燃机产品信息、建立研发数据库、开发测试设备和计算软件，为不同的内燃机生产企业开发样机和提供技术服务。这些咨询公司与生产企业的技术部门一起交互工作，所以了解企业遇到的技术难题，理解产品技术发展趋势；反过来，对企业产品开发和发展进行技术指导，促进了内燃机产品研发的国际化。高等院校进行基础理论研究，为企业产品发展提供了

新概念、新方法和新技术，也是内燃机研发活动国际化的重要力量。

3.2.2 主要先进国家内燃机产品技术水平

1. 先进国家内燃机产品技术发展概况

在内燃机产品技术发展中，由政府制定的排放法规和油耗法规对于技术的发展起了决定性的推动作用。图 3-3 表示世界主要国家对轿车和轻型载货汽车的排放法规进程，到 2015 年，发达国家都实施了更加严格的排放标准，美国执行 Tier2 标准（其中加州实行 LEV Ⅲ标准）、欧洲实行欧Ⅵ第 1 阶段标准、日本执行 2009 标准；韩国汽油轿车实行美国加州 LEV Ⅱ标准，而柴油轿车实行欧Ⅵ标准。虽然发达国家采用不同的排放标准，但是在欧Ⅵ排放阶段，NO_X 和 PM 的限值与美国 Tier2 比较接近，因此发达国家在内燃机排放控制技术上都采用了十分相近的技术措施。

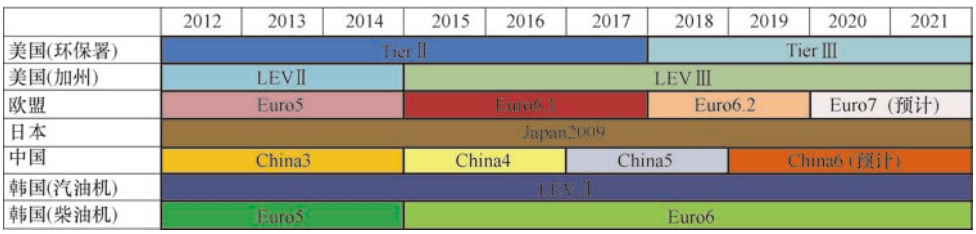


图 3-3 世界主要国家对轿车和轻型载货汽车的排放法规进程

图 3-4 表示主要国家轿车油耗控制历程和油耗限值对比（已经归一化处理为 NEDC 循环下的数值），图中实线表示轿车实际油耗数值，短划线和点线表示油耗目标。可见，在 2000 年之前美国和韩国的轿车油耗最高，中国和加拿大的油耗次之，日本和欧盟的油耗最低。随后，由于各国制定了轿车油耗控制目标，燃油消耗快速下降。到 2015 年，美国、中国和韩国的轿车油耗相近，分别为 7.3L/100km、6.9L/100km 和 6.3L/100km；欧盟、日本和印度的油耗显著较美中韩低，其中欧盟 2015 年的油耗目标为 5.5L/100km（即 CO_2 排放为 130g/km）、日本 2015 年的油耗目标为 5.3L/100km，印度在 2020 年的油耗目标为 4.8L/100km。尽管各国的油耗限值有一定差距，但是在油耗法规的推动下，各国轿车油耗均在迅速下降。由于降低发动机和整车油耗的技术措施牵涉到从整机到零部件、从设计到应用的各个方面，因此燃油消耗法规的推动带来了内燃机工业的技术革命。

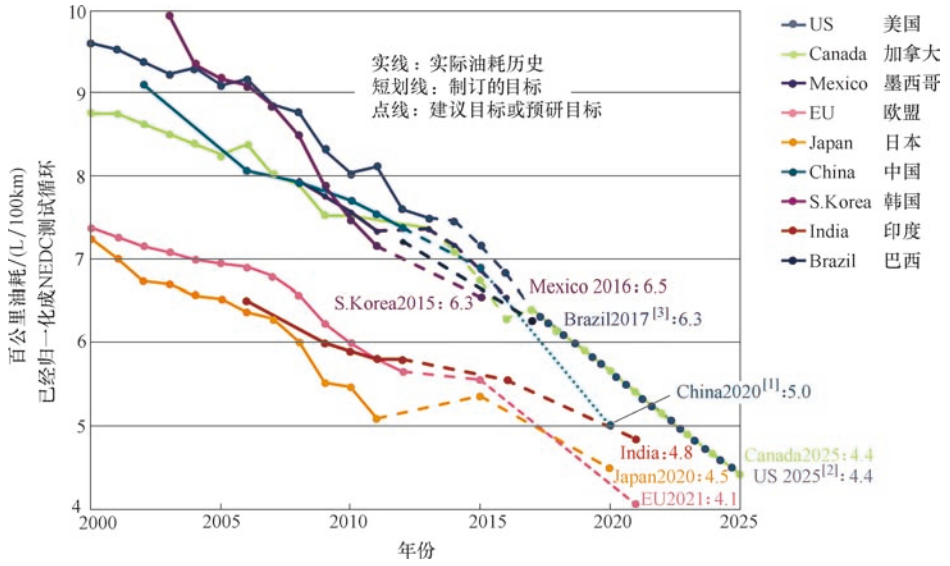


图 3-4　各国轿车油耗控制历程和油耗限值对比

（归化成 NEDC 循环下的数值，来自 Ricardo）

在日益严格的排放和油耗法规推动下，近年来各先进国家的内燃机产品技术得到了革命性进步，标志性的技术可归纳如下：

高压共轨燃油喷射技术：高压共轨燃油喷射技术对于柴油机和汽油机混合气形成和燃烧过程的发展起到极大的推动作用。高压共轨燃油喷射系统不仅可以提高喷射压力，而且喷油压力不受发动机转速的影响，还可以通过多次喷射改善喷油规律，从而达到燃烧过程优化，降低 NO_X 和 PM 排放。目前欧 VI 柴油机产品的喷油压力已达 200 ～ 240MPa，可实现 7 次喷油。缸内直喷汽油机的喷射压力已达 20 ～ 35MPa，也可以通过多次喷射控制混合气形成和燃烧放热过程，改善 PM 排放和冷起动性能。

增压和动力强化技术：增压系统的发展主要是为了强化动力、增加低速转矩、降低排放和油耗。目前带放气阀的增压器、可变截面增压器、双涡非对称增压器、二级增压器等都得到了快速发展和应用。通过增压技术实现发动机小型强化（Downsize）是当前轻型车用发动机的发展趋势，其基本概念是通过功率强化，用小排量的发动机取代大排量的发动机，使得发动机重量减轻、摩擦损失减少、热量损失减少、泵气损失下降且常用工况运行在较高负荷的低比油耗区域，这样既减小了发动机的油耗和排放，又保持了功率和转矩不变或略有

增加。Downsize 技术核心是提高功率密度，因此目前车用柴油机产品的功率密度已达 60 ～ 90kW/L，车用汽油机产品的功率密度已达 80 ～ 110kW/L。通过增压技术实现降速强化（Downspeed）则是当前重型车用柴油机的发展趋势，即通过降低发动机转速，降低摩擦损失，从而提高机械效率，改善燃油经济性。降速强化的技术核心是提高平均有效压力，目前重型车用柴油机的转速已经从 2 200 ～ 2 500r/min 降低到 1 800 ～ 2 000r/min。

先进的排放控制技术：随着排放法规的日益严格，在发动机机内净化技术上，发展了带中冷器的高压循环和低压循环两种废气再循环（EGR）系统，EGR 量的控制精确而快速。在柴油机排气后处理技术上，发展了氧化催化反应器（DOC），可降低 HC/CO 排放达 95% 以上；柴油机颗粒过滤器（DPF），可以降低颗粒排放的质量达 90% 以上，而且几乎是唯一能够满足欧Ⅵ法规颗粒数量（PN）要求的技术措施；可选择性催化反应器（SCR）和稀燃 NO_X 捕获器（LNT），都可以降低 NO_X 达 85% 以上。SCR 和 LNT 在轿车和轻型载货汽车上都有应用，但在重型载货汽车、工程机械及船舶上，几乎全部采用 SCR 来降低 NO_X 排放。在汽油机排气后处理技术上，发展了三元催化转化器，当发动机在理论空燃比附近运行时可以同时降低 HC、CO 和 NO_X 达 95% 以上；在缸内直喷汽油机颗粒排放后处理上，发展了用于汽油机的颗粒过滤器（GPF），可以使颗粒质量（PM）和数量（PN）排放满足欧Ⅵ排放法规的要求。

高效清洁燃烧技术：在严格的排放和油耗法规要求下，发动机产品不但采用了高压多次喷射、EGR 和排气后处理等技术，而且还发展起来了可变涡流和滚流、可变截面增压（VGT）或二级增压、可变配气相位和升程（VVT、VVL）、米勒循环进气相位等新型可变燃烧技术，这些技术极大地改善了部分工况的油耗和排放，兼顾了全工况的综合性能。但是在这些技术的综合运用方面，需要对发动机燃烧过程进行精细地设计和匹配，需要在宽广的转速和负荷范围内对喷油、流动、EGR、配气相位等进行多模式、分区段的燃烧控制。燃烧过程在全工况运行范围内进行精细优化和匹配已成为现代发动机最重要的研发工作之一。

发动机电子控制技术：电子控制技术最早仅应用于发动机燃油喷射系统上，控制喷油压力、喷油定时和喷射次数等。随着废气再循环、可变截面增压器、可变涡流和滚流、可变配气相位、排气后处理器等技术的应用，以及对于整车变速器、油门踏板等传动系统的控制，目前电子控制单元（ECU）要对发动机和整车多达十几个参数进行独立地控制。考虑到发动机不同运行工况、环境温度、海拔

高度等对发动机燃烧、性能和排放的要求，电子控制系统需要引入成百上千个独立变量、二维变量、三维 MAP 图、数据库和预测模型，成为一个十分复杂的运算和控制“大脑”，指挥着发动机和车辆的运行。发动机电子控制系统的软件和硬件开发，已经成为现代内燃机显著的技术特征。

发动机热管理技术：为了减少发动机的散热损失，按照发动机实际运行工况对冷却系统和润滑系统的热流进行优化，对冷却水泵、风扇和机油泵等按照工况的需求进行调控和开关，调节高温和低温冷却循环，根据排放要求适时旁通增压中冷及 EGR 冷却等。此外，DPF 或 GPF、SCR、LNT 等后处理器的最佳转化效率优化和再生过程控制，都需要提高排气温度，因此对排气温度的控制也成为热管理技术的一项重要内容。

均质压燃及低温燃烧技术：由于这一新型燃烧技术可以在缸内实现非常低的 NO_X 和 PM 排放，从而在国际上得到极为广泛的研究和样机开发。其原理是通过大比例 EGR 和多次喷油技术，实现混合气均匀分布或预混合，燃料自燃着火，并在低温条件下快速燃烧放热，极大地降低了部分负荷运行区域的 NO_X 和 PM 排放。目前已经能够在发动机常用的排放控制工况范围内实现低温燃烧过程，并且已经能够在样机上得到良好的试验结果。这一新型燃烧过程的研究，还极大地促进了人们对于内燃机混合气形成和燃烧过程机理的认识。

废气能量利用技术：内燃机排气能量损失占三分之一左右，因此充分利用这些能量对于提高燃油经济性具有重要的意义。废气涡轮增压和废气再循环是两种已经产品化应用的排气能量利用方式。国际上正在开展研究的废气能量利用技术还有动力涡轮、朗肯循环和热电材料发电，进一步回收排放余热，提高循环有效热效率。其中朗肯循环技术已经能在大型船舶内燃机和发电内燃机上应用，但是在车用内燃机上的应用仍然处于开发阶段。

发动机摩擦损失、泵气损失和附件功耗控制技术：这些技术是提高发动机有效热效率的重要途径。通过气缸和活塞环、曲轴和轴承、配气系统等结构改进，润滑系统优化控制，润滑油改进等措施，达到降低摩擦损失的目的；对于油泵、水泵、风扇、发电机等附件，实行电子控制，按照工况变化控制其运行状态，降低附件功耗损失；在气道设计、配气机构设计、排气背压控制、节气门控制上进行细致优化，降低进排气阻力，提高充气效率。

先进材料和结构技术：近年来随着内燃机动力强化和功率密度的提高，机械负荷和热负荷不断提高，内燃机材料和结构需要能够承受更大的燃烧压力和

表面温度。传统的铝合金缸盖和活塞承受的最大爆压不足 20MPa、最高表面温度为 350℃左右，但是新开发的高功率密度发动机所要求的最大爆压已经达到 22 ～ 24MPa，受热件的表面温度超过了 400℃，因此需要开发蠕墨铸铁缸盖和机体、钢质活塞等新材料和结构。

先进试验测试和模拟计算技术：随着排放法规和油耗法规日益严格，内燃机先进技术的应用越来越多，开发过程越来越精细，也遇到了大量新挑战，因此需要发展新的测试技术和模拟计算技术。近年来，在试验测试技术方面，发展了大量光学诊断设备和方法，用于对喷雾、流动、燃烧和结构进行可视化研究；发展了颗粒数量 PN 的测试、更精确的 PM 排放测试、发动机瞬态性能测试等设备；发展了发动机在线诊断仪器设备；特别是大大提高了发动机常规试验的测试精度，满足了日益严格的油耗和排放标定的需求。在模拟计算技术方面，开发了更加先进的流动、燃烧、结构、性能等计算和预测软件，网格处理更简便、计算精度更高、计算速度更快，能够比较准确地预测发动机性能、油耗、排放和结构可靠性等，大大节约了发动机开发成本和时间。

发动机及整车标定技术：所谓标定就是通过大量的发动机台架试验和整车道路试验，在全工况范围内（包括高温、低温和高原环境）对喷油、进气、增压、燃烧、排气后处理等系统进行综合优化匹配，使发动机和整车满足动力性、排放、油耗、驾驶性、噪声、可靠性、一致性等综合性能目标要求。从欧Ⅳ排放开始，标定工作日益成为发动机性能开发流程中最重要、最繁杂、最费时的内容。目前也大力发展了基于模型的标定技术，把发动机瞬态运行过程进行计算机模拟，开展传感器和发动机性能的初步标定工作，替代了大量的试验，节约了标定工作量。

多元化燃料技术：为了节约石油资源，减少 CO_2 排放，内燃机工业界开展了大量燃料替代技术的研究和应用开发，这些替代燃料包括：各种生物柴油、甲醇、乙醇、二甲醚、天然气、液化石油气、氢气、各种燃气（以甲烷为主要成分的混合气体）等。目前已经在发动机产品得到实际应用、并在一些国家加油站出售的燃料种类有：柴油与生物柴油的混合燃料（如 B5、B10、B20 等）、汽油与甲醇或乙醇的混合燃料（如 E10、E20、M15 等）、压缩天然气、液化石油气、以甲烷为主的混合燃气等，燃料多元化发展的趋势非常明显。

混合动力技术：由于油耗法规的推动，各国在混合动力的研发和推广方面取得了很大的进展。混合动力是由内燃机、电动机和电池组成的动力系统，内燃机

的作用是一方面和电动机一起驱动车辆，另一方面给电池供电，让电池储存足够的电力来驱动电动机。在混合动力系统中，内燃机的运行工况可以选择在燃油消耗较低的高效区域，大大提高了燃油经济性。在日本丰田、日产、本田等公司的推动下，全球各大汽车公司纷纷开发混合动力新产品，2013 年世界混合动力汽车的年产量已达 30 万辆，虽然只占汽车总产量的 0.4% 左右，但未来的发展前景非常广阔。此外，近年来越来越多的厂家在汽车新产品上采用了微混合动力技术，这些技术有：①起动—停车（Stop-Start）技术，即在汽车怠速运行时（如等待红灯时），停止发动机运行，而当汽车需要起动时再重新快速起动发动机运行。②制动能量回收技术，即在汽车制动时把制动的能量转化为电能或压缩空气，储存起来，在汽车起动、加速等工况时释放，增加汽车的动力性。③停缸技术也开始在新产品上应用，其原理是在小负荷运行时，停止向某一部分气缸喷油，而只让其他的气缸正常工作。这些微混合动力技术的应用，能降低燃油消耗 5% ～ 10%，显著提高了燃油经济性。

2. 先进国家内燃机技术发展水平分析

前面已经对先进国家内燃机产品技术发展进行了概述，本节主要根据内燃机在不同领域的应用情况，比较详细地论述产品的技术水平。

（1）车用汽油机产品技术水平　长期以来，自然吸气式气道喷射汽油机（PFI）主导了车用汽油机市场。随着油耗法规的推动，从 2007 年开始，豪华轿车制造商（如奔驰、宝马、奥迪）率先开发缸内直喷汽油机（GDI）和具有涡轮增压的直喷汽油机（TGDI），随后普通轿车制造商也开始纷纷推出了 GDI 和 TGDI 产品，使得 PFI 汽油机的市场占有率开始下降。虽然有所下降，在欧洲轿车市场上 PFI 汽油机仍然占 70% 左右的份额。

PFI、GDI 和 TGDI 三类汽油机各有优缺点。PFI 汽油机的主要优点为：喷油压力只有 0.3 ～ 0.5MPa，因此喷油系统成本很低；燃油在进入气缸之前就与空气进行混合，因此缸内混合气分布均匀，燃烧产生的颗粒排放很低，满足欧Ⅵ法规对 PM 和 PN 排放的要求；在当量混合比下运行，能够通过三元催化转化器满足欧Ⅵ排放要求。近年来，通过组织较强的进气滚流、优化喷射过程、采用可变配气相位等燃烧技术，可使压缩比提高到 11 以上而不发生爆燃，因而热效率比传统 PFI 提高了 3 ～ 5 个百分点。其主要缺点是：节气门控制混合气量，进气道和进气门处会黏附大量油膜，所以部分负荷燃油经济性差。PFI 汽油机由于成本低廉，仍然是普通轿车的首选机型。统计结果表明，截至 2013 年，欧洲豪华轿车制造

商新开发的汽油机产品几乎全部采用了直喷汽油机，大众和福特新产品中有一半为 PFI 机型，而大多数普通轿车制造商（如雷诺、标致、雪铁龙、菲亚特等）仍然采用 PFI 为主要机型。

GTI 汽油机比 PFI 汽油机具有下列优点：采用高压共轨燃油喷射系统直接将汽油喷射到缸内，不存在黏附在气道和气门表面的油膜现象，燃油计量精确；进气过程中进入缸内的是纯空气，容积效率高；燃油在缸内蒸发和混合，导致缸内温度下降，因此压缩比可适当提高 0.5 ～ 1 个单位，热效率提高；缸内混合气控制灵活，在大负荷时可在进气过程中喷油，形成均质混合气，提高输出功率，在部分负荷时可在压缩过程中喷油，形成分层稀混合气，改善了部分负荷的燃油经济性；但目前的 GDI 大多采用均质化学当量比工作模式，因为稀燃模式需要高成本的后处理技术。GDI 的主要缺点是：喷油压力高达 10 ～ 30MPa，因此燃油喷射系统成本高；燃油喷雾随气流运动会黏附在活塞表面或气缸壁上，尤其在压缩后期喷油时，“湿壁”现象更加严重，造成了类似于柴油机一样的碳烟排放和机油稀释现象严重；在低温起动和暖机过程中，缸内形成分层燃烧，此时混合气分布极不均匀，导致了更加严重的 HC 和碳烟排放，因此，GDI 无法直接满足欧Ⅵ法规对于 PM 和 PN 的排放要求，必须增加一个专门为 GDI 开发的颗粒过滤器 GPF。

TGDI 是在 GDI 的机型上增加涡轮增压，以实现汽油机小型强化。与柴油机增压技术相比，汽油机增压技术更具有挑战性，包括要承受更高的排气温度（高达 950 ～ 1 050℃）、更宽的转速范围和流量范围。汽油机增压技术的特点包括，电子控制的废气放气阀、全浮动轴承等。为改善低速条件下的动态响应和提高低速转矩，还采用排气歧管和增压器壳体的一体化结构、涡轮增压串联机械增压等技术。

在 TGDI 汽油机上开展小型强化（Downsize）是近几年发展最迅猛的车用汽油机技术。严格地说，Downsize 并不是一项独立的技术，而是一个设计的概念或理念，设计的目标就是小排量、高功率密度和高燃油经济性。因此，通常 Downsize 技术设计除了采用涡轮增压以外，还包含若干综合性技术措施：缸盖、机体、活塞等结构件的强度和刚度优化，以承受更大的燃烧压力和平均有效压力；降低各运动副的摩擦，以提高机械效率；采用冷却系统优化和热管理，以减少散热损失；进行缸内滚流运动、多次喷射策略和燃烧过程优化，以提高功率和降低排放；采用可变配气相位，以优化全工况充气效率；在部分工况下采用内部 EGR 方法增加缸内残余废气，以降低 NO_x 排放，等等。福特汽车公司于 2011 年开发的 Eco-

Boost 1.0L 3 缸 TGDI 汽油机是最早在普通小型轿车产品上成功应用的 Downsize 机型，随后，大众、通用、现代等汽车公司也开发了 1.0 ～ 1.2L 小排量 Downsize 汽油机。表 3-4 给出了福特和大众 1.0L TGDI 汽油机的结构和主要参数。由表可见，两款 Downsize 汽油机通过采用涡轮增压、结构设计、多次喷油、可变配气、燃烧优化、低摩擦、热管理、附件控制等技术，分别达到了 92kW/L 和 85kW/L 的功率密度，以及 200N·m/L 的升转矩，因而可以分别取代福特和大众小型轿车中排量为 1.2 ～ 1.6L 的 PFI 汽油机，CO_2 排放接近于柴油机的水平，低于 2015 年欧洲 130g/km 油耗标准，接近于 2020 年的油耗标准（95g/km）。

表 3-4　福特和大众 1.0L 直喷增压汽油机对比

比较项目	福特 1.0 EcoBoost 汽油机	大众 1.0L E211 汽油机
缸径 / 冲程 /mm	71.9/82	74.5/76.4
增压系统	带放气阀增压器	带放气阀增压器，压比为 2.6
压缩比	10 ： 1	10.5 ： 1
额定功率 /kW	92 （6 000r/min） （95 号汽油）	85 （5 500r/min）
最大转矩 /N·m	170 ～ 200 （1 500 ～ 4 500r/min）	160 ～ 200 （2 000 ～ 2 500r/min）
排 放	欧 V 和欧 VI	欧 VI
喷油压力 /MPa	20	25
喷嘴	多孔	5 孔
进气道	直气道组织滚流运动	直气道组织滚流运动
排气管	整体集成于缸盖中	整体集成于缸盖中
气缸盖	铝合金	铝合金（AlSi10Mg（Cu））
气缸体	铸铁	铝合金（压铸）、铸铁缸套
可变配气相位	进排气 60° CA 可调	进气 50℃ A 可调，排气 40℃ A 可调
冷却系统热管理	冷却液温度 92℃，当液温不足 75℃时，主要冷却排气门侧	冷却液温度 87℃，冷却系统优化和流量控制
机油泵	根据工况需要变流量控制	根据工况需要变流量控制
拟取代机型	Fiesta 和 Focus 等轿车中 1.25L、1.4L 和 1.6L PFI 机型	Polo 和 Golf 等轿车中 1.2L、1.4L、1.6L PFI 机型
CO_2 排放	在 Focus（92kW）轿车上为 114g/km；在 Focus 轿车（74kW）上为 109g/km	在功率为 70kW 和 81kW 的 Polo 轿车上为 94g/km；在功率为 85kW Golf 轿车上为 100g/km

但是，TGDI 汽油机小型强化的过程中出现了一些新的挑战。首先，由于进气增压以后温度升高，所以爆燃倾向严重，压缩比要比 GDI 下降 0.5 ～ 1 个单位，因此热效率较 GDI 低，比油耗比 GDI 和 PFI 高，需要采取其他措施提高燃油经济性。其次，在低速大负荷运行时，非常容易出现超级爆燃现象，其最大爆发压力可达结构允许值的数倍，在几个循环内足以造成发动机破坏，产生了严重的可靠性问题。国际上已经对超级爆燃的机理和预防措施进行了大量研究，企业在 TGDI 产品开发中需要进行大量试验标定，解决超级爆燃的问题。

此外，汽油机的转速范围宽广，固定不变的气门定时和升程则很难兼顾高低速的性能。汽油机在 Downsize 后负荷范围也更加宽广，因此需要宽广的进排气门定时控制和升程控制。可变气门定时控制技术（VVT）早已成熟且在汽油机上得到广泛应用，而可变气门升程技术（VVL）可认为是 VVT 的进一步发展。与 VVT 相比，VVL 同时改变了气门定时和气门升程，更好地满足了发动机的要求。

车用汽油机的有害排放控制比柴油机简单得多，从欧Ⅳ到欧Ⅵ，三元催化转化器一直是一个十分有效的方法，在当量混合比条件下可同时将 HC、CO 和 NO_X 降低 90% 以上。对于 PFI 汽油机，只用三元催化转化器即可满足严格的排放法规；而对于 GDI 或 TGDI 汽油机，发动机过高的 PM 和 PN 排放可以通过在三元催化转化器后面增加一个颗粒过滤器（GPF）解决，也可以通过缸内直喷和气道喷射两套喷油系统或者 300 ～ 400MPa 高压缸内喷射来解决。最新的技术可以把 GPF 与三元催化转化器集成在一起，形成一个四元催化转化器。由于 NEDC 排放测试循环是从怠速开始的，因此大量的研究集中在如何快速提高排气温度，从而提高三元催化转化器的转化效率，减少怠速和暖机时期的 HC 和 CO 排放。

（2）轻型车用柴油机产品技术水平　近年来，先进国家轻型车用柴油机围绕欧Ⅵ和美国 Tier2 排放法规以及各国油耗法规开展产品开发，主要在排放控制和小型强化（Downsize）方面取得了实质性进展。

柴油机的排放控制技术主要由机内排放控制和排气后处理控制两方面措施组成。在机内排放控制上，主要采用提高共轨喷油压力、带冷却的 EGR 和优化燃烧过程；在排气后处理上，主要由 DOC 降低 HC 和 CO 排放，由 DPF 降低 PM 和 PN 排放，由 SCR 或 LNT 降低 NO_X 排放。在欧Ⅴ排放阶段，轻型车用柴油机普遍采用“高压共轨 + 燃烧优化 +EGR+DOC+DPF”组成的排放控制系统，其中共轨压力一般为 200MPa 左右，EGR 一般采用高压循环。DPF 在颗粒积存满了以

后需要再生，否则将造成排气背压升高，燃烧过程恶化。再生的过程为：通过缸内燃油后喷或在 DPF 之前喷射燃油，提高排气温度到 650℃左右，然后积存的碳粒会氧化燃烧掉。在 DPF 表层涂敷催化剂（CDPF）或者利用 DOC 将柴油机排出的 NO 转化为 NO_2，而碳粒在 NO_2 环境下能在 350℃左右较低的温度下燃烧，从而大大降低了再生过程对排气温度的需求。

排放法规从欧Ⅴ到欧Ⅵ的主要变化为：NO_X 进一步降低 45%，在线诊断（OBD）率大大提高。因此，欧Ⅵ排放技术需要在三个方面得到改进：第一、在排气后处理系统上增加一个 NO_X 后处理器；第二、在传统高压 EGR 循环基础上，增加一个低压 EGR 循环；第三、对更多影响排放的参量进行 OBD 检测。

在 NO_X 后处理器上有两个选择，即 SCR 或 LNT。SCR 的基本原理是 NO_X 与氨或尿素在 250℃以上的温度下经过一系列化学反应分解为 N_2 和 O_2，转化效率可达 90% 以上，因此 SCR 系统需要尿素储存和喷射装置，在其前端喷入尿素；尿素的喷射量应与发动机缸内产生的 NO_X 量相适应，过多地喷射尿素会造成氨泄漏，由于氨为温室效应气体，所以欧Ⅵ法规对于氨泄漏进行了限制。此外，尿素通常在 200℃以下的低温环境下会结晶，沉积在 SCR 中，影响 SCR 正常工作。LNT 的基本原理是：在稀混合气条件下 NO 在催化剂的作用下氧化成 NO_2，吸附在一种吸附剂（如氧化钡）上成为盐类（如硝酸钡），称为吸附过程；在浓混合气条件下，该盐类在 HC 作用下还原成 NO，然后再在催化剂作用下进一步还原成 N_2，称为还原过程。在柴油机上 LNT 吸附过程和还原过程的周期为 1 ～ 2min，因此，需要不断地采用燃油后喷或在 LNT 之前进行燃油喷射，以便在 LNT 中形成浓混合气条件，促进 LNT 再生。LNT 工作温度和转化率取决于催化剂的优选，一般可在 200 ～ 450℃宽广的温度范围内可达 90% 的转化率。在轻型车用柴油机上选择 SCR 还是 LNT 是各大汽车企业首先考虑的问题，SCR 的优点是不用再生，因此不会增加燃油消耗；但是需要较大空间布置 SCR 系统，而且需要购买尿素、存在尿素低温结晶问题、需要在线检测氨泄漏量并且在 SCR 之后安装除氨催化反应器（ASC），增加了开发成本和使用成本。LNT 的优点是不需要额外的空间添加辅助系统，但是需要额外的燃油喷射进行再生，因此燃油消耗将提高约 4% 左右；此外，燃料中的硫含量对于 LNT 转化效率和耐久性有很大的影响，当硫含量超过 10ppm 时，将需要在排气系统中增加一个脱硫装置，当排气温度达到 650 ～ 750℃时，可以去除 LNT 中的硫化盐类沉积物。

SCR 和 LNT 在欧Ⅵ轻型车用柴油机上都有应用，图 3-5 表示 2009 年大众汽

车公司为美国 Jetta（捷达）轿车开发的 2.0L TDI 柴油机的排气控制系统，满足美国 Teir2/BIN5 和 LEV2 排放，当然也满足欧Ⅵ排放。由图可见，排放控制系统采用了高压循环 EGR、低压循环 EGR、DPF、LNT（即图中的 NSC）以及脱硫装置（图中的 H_2S 催化器）。

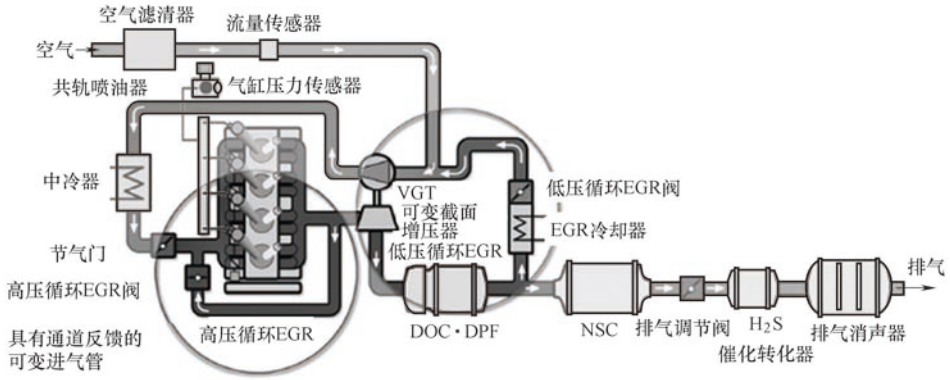


图 3-5　大众汽车公司为 2.0L TDI 柴油机开发的排放控制系统

与车用汽油机一样，车用轻型柴油机的另一个重要技术发展是 Downsize 开发。2010 年宝马汽车公司为 740D 柴油轿车开发了直列 6 缸 3.0L TDI 柴油机，在 4 500r/min 时达到了升功率 75kW/L、在 1 500 ～ 2 500r/min 时达到升转矩 200N·m/L 的高强化性能指标，排放达到欧Ⅴ标准。主要措施为：采用二级增压系统（增压比为 3.7 左右）、200MPa 压电晶体共轨燃油喷射系统、最大燃烧压力限值提高到 18MPa、压缩比降低为 16.5、缸内混合气形成和燃烧过程进行仔细优化。与原来 7 系轿车使用的 V8 4.0L 柴油机相比，油耗下降了 20%，百公里加速时间从原来的 6.7s 缩短为 6.3s。图 3-6 表示了该 3.0 TDI 柴油机的功率和转矩曲线与原 V8 柴油机的对比。

2012 年大众汽车公司为新 Passat 轿车开发了一款 2.0L TDI 柴油机，在 4 000r/min 时达到了升功率 88kW/L，在 1 750 ～ 2 500r/min 达到了升转矩 250N·m/L。在增压技术上采用了二级涡轮增压系统，其中第一级的压比为 1.7，第二级的压比为 3.3；在燃油系统上采用了博世（Bosch）CP4 高压油泵和新一代压电晶体喷油器，喷油压力高达 250MPa；在燃烧系统上，将压缩比从 16.2 降低到 15.5，进行缸内涡流和喷雾优化；在排放后处理上，采用高压和低压 EGR、SCR 后处理器降低 NO_X 排放，使排放达到欧Ⅵ水平。在 Passat 轿车应用表明，百公里油耗为 5.3L，CO_2 排放为 139g/km，百公里加速时间仅为 6.1s。

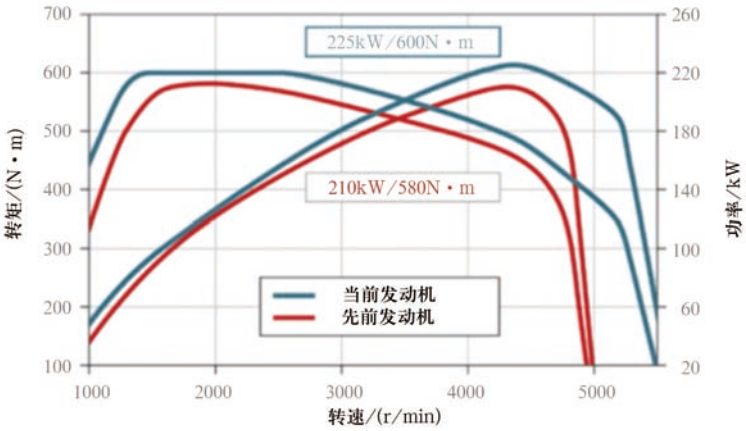


图 3-6　BMW 直列 6 缸 3.0L TDI 柴油机性能曲线与以前 V8 柴油机对比

此外，Bosch 和 FEV 均开发了 3 缸车用柴油机。Bosch 开发的 3 缸柴油机排量为 1.5L，压缩比为 15，采用紧凑的二级顺序增压系统，240MPa 压电晶体 CR13 喷油器和 CP4.1 喷油泵，在 18MPa 最大燃烧压力限值下达到了升功率 72kW/L、升转矩 300N·m/L 的高强化指标，可以取代原来的 4 缸柴油机，排量缩小了 25%。FEV 于 2011 年推出了 3 缸车用柴油机样机，其单缸排量为 0.4 ～ 0.5L，发动机额定转速为 4 800r/min，压缩比为 13.8 ～ 15，最大燃烧压力限值为 20MPa，喷油压力为 200MPa，采用二级增压系统（压缩比为 4.0 左右）；通过进气门阀座的定向开口槽结构和可变升程，在缸内实现了可变涡流，兼顾高低速性能；该发动机最终达到了 105kW/L 的功率密度和 300N·m/L 的升转矩。

与欧洲的情况不同，美国市场销售的轿车和轻型载货汽车中很少采用柴油机作为动力。但是近年来，面临汽车油耗法规的压力，美国汽车制造业也开始采用柴油机作为乘用车动力，一个典型例子是克莱斯勒最热销的 RAM 1 500 皮卡采用了意大利 VM 公司开发的 Eco-Diesel 柴油机。该机型的主要参数包括：V 形 6 缸，排量仅为 3L，4 000r/min 时达到最大功率 177kW，1 800r/min 达到最大转矩 570N·m。为了在满足 EPA Tier2 排放的前提下提供优异的性能和燃油经济性，采用了高标准的平台设计，配置了一系列先进技术：4 气门、全铝合金缸盖、双顶置凸轮轴、最高喷射压力为 200MPa 的高压共轨燃油喷射系统、可变几何截面增压器（VGT）、冷却的 EGR 以及 DPF+SCR 的复合式后处理系统。装备该款柴油机的 RAM 1 500 皮卡展示了极佳的动力性，0 ～ 60mile（1mile=1.609km）的加速时间仅为 7.75s，综合路况的油耗水平改善至 24MPG

左右。这款 Eco-Diesel V6 柴油机于 2014 年和 2015 年连续两年入选沃德十佳发动机，装备该款柴油机的 RAM 1500 皮卡是多年来在美国市场得到热销的唯一一款柴油动力的轻型汽车。

（3）重型车用柴油机技术水平　欧洲重型车用柴油机于 2013 年实行了欧Ⅵ排放标准，其 NO_X 和 PM 限值分别比欧Ⅴ下降了 80% 和 50%，并首次对颗粒数量 PN 进行了限制（PN ≤ 8×10^{11}）；而且排放测试循环也从稳态 ESC 循环和瞬态 ETC 循环分别改为了世界统一循环 WHSC（稳态）和 WHTC（瞬态），更符合重型载货汽车的道路行驶状况。美国重型车用柴油机的排放标准为 EPA 2010，其限值与欧Ⅵ相近，但测试循环为美国 FTP 循环。在燃油法规上，欧洲对载质量＜12t 的重型载货汽车用柴油机限定的 CO_2 标准为 160g/km（到 2015 年），对于更大吨位重型载货汽车虽然还没有设定油耗限值，但是由于重型载货汽车运输占欧洲货运总量的 80%，因此重型载货汽车用户非常关注燃油消耗。同样在美国，虽然油价便宜，消费者很少在意乘用车每加仑汽油行驶的英里值（MPG），但重型商用车的车主却始终极为关注发动机的燃油耗，因为燃油费用在整个营运费用中占有很大比例。在排放和油耗的推动下，重型载货汽车和大客车用柴油机产品取得了如下技术进展：

欧Ⅴ重型车用柴油机典型的排放技术路线为“高压共轨 + 燃烧优化 +DOC+SCR”，但在欧Ⅵ和 EPA2010 排放控制技术上，重型车用柴油机几乎采用了所有的排放控制技术，典型的技术路线为“高压共轨 + 燃烧优化 +DOC+EGR+SCR+DPF+ASC”，如图 3-7 所示。共轨压力要大于 200MPa，这样才能促进燃油的雾化、蒸发及其与空气的良好混合，降低 PM 排放；EGR 系统是针对欧Ⅵ排放新添加的技术，一般只采用高压 EGR 循环，以降低缸内 NO_X 排放，但更重要的作用是当排气温度不能达到 SCR 的工作温度时（如暖机、低负荷工况等），EGR 承担降低 NO_X 的主要任务；DPF 是欧Ⅵ排放新添加的后处理技术，目的是降低 PM 和 PN 排放。ASC 是一个除氨催化器，主要是消除氨泄漏，满足欧Ⅵ标准对氨排放的限制。

SCR 从欧Ⅴ就开始应用了，但是由于欧Ⅵ排放瞬态循环改为 WHTC 循环，与 ETC 循环相比，更多的运行工况为转速和负荷较低的工况，因此排气温度较低；而且 WHTC 测试循环是从起动工况开始的，在长达约 20min 的暖机过程中排气温度不足 200℃。SCR 转化效率与排气温度有很大关系，当排气温度高于 300℃时，NO_X 转化效率＞ 80%；当排气温度低于 280℃时，转化效率显著下降；当排气温

度低于200℃时，尿素停喷，以减少氨排放、防止结晶。所以，在欧Ⅵ排放控制中，面临提高排气温度和SCR转化效率优化的技术挑战。

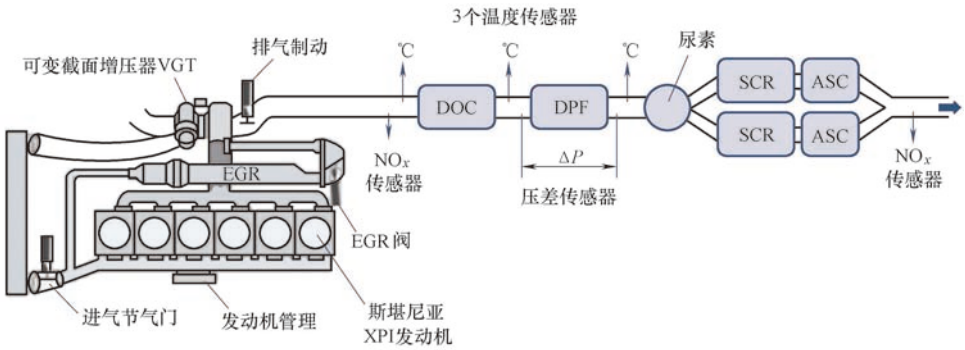


图 3-7　斯堪尼亚公司 XPI 重型车用柴油机欧Ⅵ排放控制技术

为了降低燃油消耗，重型车用柴油机多采用降速强化（Downspeed）技术。Downspeed的概念是基于发动机的摩擦与转速的平方成正比，所以降低转速就可以提高机械效率，从而获得更多的有效热效率。当发动机额定转速降低时，若要保持输出功率不变，发动机转矩就要提高，因此Downspeed的实质就是动力强化。实现动力强化就需要采取提高增压压力、提高喷油压力、优化混合气形成和燃烧过程、提高结构强度和刚度、加强热管理等一系列技术措施。近几年新开发的重型车用柴油机的额定转速已经从原来的2 200～2 400r/min降低到1 800～2 000r/min。

康明斯公司在美国市场开发的ISX重型商用车柴油机是Downspeed技术的典型代表。该V8发动机在2 000r/min时输出功率达447kW，在1 200r/min时达到最大转矩2 780N·m，最低比油耗为180g/kW·h。ISX发动机平台设计和配置都非常先进，主要特点有：顶置式凸轮轴、组合式活塞、机体结构能承受最大25MPa的燃烧压力，采用了冷却EGR技术，配备了最大喷射压力为240MPa的XPI共轨燃油喷射系统、可变几何截面增压器（VGT）。为了满足EPA 2010排放法规，还同时配置了一个复杂的排气后处理器系统，由DOC、SCR、DPF及DPF再生所用的燃烧器组成。

2012年，戴姆勒公司在欧洲市场上开发了OM470直列6缸重型车用柴油机，其缸径为125mm，冲程为145mm，压缩比为17.6。在转速1 800r/min时达到额定功率240kW，在转速1 100r/min时达到了最大转矩1 700～2 100N·m。在增压系统上，采用了BorgWarner公司一个带放气阀的增压器，为了能确保EGR的

流量，运用了非对称双蜗壳结构；在燃烧系统上，采用最大喷油压力为 210MPa 的共轨燃油系统和冷却 EGR 系统，仔细进行了燃油喷雾和燃烧室的优化；在排放后处理上，采用了两个并行的排气管路系统，在每一个管路系统上依次布置了 DOC、DPF、SCR 和 ASC 后处理器，两个排气管路系统在发动机排气总管不远处交汇，在交汇的前端安装了燃油喷油器，以提高排气温度进行 DPF 再生。该发动机用于重型车辆时，标定功率时的热效率为 44%，最大热效率为 45%。

在降低燃油消耗上，美国能源部于 2010 年推出了超级载货汽车的研究课题，目的就是要把发动机有效热效率从目前的 44% 提高到 50%。在康明斯公司的领导下，开展了朗肯循环废气利用、先进增压、高压喷油和燃烧优化、可变配气、低温燃烧、降低摩擦等内燃机技术研究，以及整车空气动力学、制动能量回收、轮胎摩擦等汽车技术研究，但是迄今，重型车用柴油机产品的有效热效率仍然不超过 46%，许多技术有待于进一步研究和应用。

（4）非道路柴油机技术水平　非道路柴油机用途复杂，可用于农业机械、工程机械、矿山机械、发电设备等，使用环境和条件非常恶劣（如高粉尘、高海拔、高湿度、极热和极寒等），且长时间在高速、高负荷工况下运行。在非道路柴油机排放法规上，欧洲和美国具有基本相同的限值和测试循环，测试循环均为 NRSC（稳态循环）和 NRTC（瞬态循环）。从 2014 年起执行第 4 阶段（欧洲称 Stage4、美国称 Tier4）排放标准。对于发动机功率为 130 ～ 560kW 的柴油机，Stage4 的限值为：$NO_X \leqslant 0.4g/kW \cdot h$，$PM \leqslant 0.025g/kW \cdot h$。其中 NO_X 限值与欧Ⅵ重型车用柴油机 NO_X 限值接近，PM 限值与欧Ⅴ重型车用标准相近，比欧Ⅵ高出 1.5 倍。此外，Stage4 不考虑 PN 排放。比较非道路柴油机排放循环（NRTC）和欧Ⅵ重型车用柴油机排放循环（WHTC）发现，非道路柴油机的排放循环多集中于高速大负荷工况，而车用柴油机排放循环多集中于中低速工况。

由于上述排放法规和运行工况的差别，非道路 Stage4 柴油机的排放控制技术与欧Ⅵ车用柴油机排放控制技术略有不同。主要表现在下面两个方面：第一，由于在高速大负荷工况下运行，排气温度较高，因此 SCR 的转换效率较高，与带冷却的 EGR 系统一起，可以将 NO_X 降低 90% 以上；另一方面，Stage4 的 PM 限值与重型车欧Ⅴ相近，且没有 PN 限制，所以如果缸内燃烧过程和 SCR 的转化效率得到了非常好的综合优化，则可在缸内将 PM 降低到限值以内，这样在排放控制技术路线上可以去掉 DPF 后处理器，选用“高压共轨 + 燃烧优化 +DOC+EGR+SCR+ASC”技术路线；如果燃烧系统无法将 PM 降低到限值内，则

依旧需要采用与欧Ⅵ重型车用柴油机相同的技术路线，即“高压共轨 + 燃烧优化 +DOC+EGR+SCR+DPF+ASC”。第二，由于运行工况与欧Ⅵ重型车用柴油机不同，因此在增压匹配、喷孔设计、燃烧室设计、标定软件开发等方面将与欧Ⅵ车用柴油机不同。

卡特彼勒 C9 柴油机可能是美国市场应用最广泛的非道路用发动机。为满足最新的 Tier 4 排放法规，卡特彼勒推出了新版 C9 发动机。该发动机采用高压共轨燃油系统取代了 HEUI（高压电控泵喷嘴系统），喷油压力 200MPa；与重型车用柴油机一样应用了一套复杂的后处理系统，包括 DOC、SCR 和 DPF。尽管 C9 的主要性能指标不算非常先进，但其良好的可靠性和耐久性指标确保了作为卡特彼勒工程机械动力的资格。

戴姆勒公司开发的 OM470 直列 6 缸 10.7L 非道路柴油机，是在同款欧Ⅵ重型车用柴油机上开发的（如前所述），虽然基本的发动机结构参数和零部件（如压缩比、喷孔流量、喷油压力、最大增压比等）保持不变，面对非道路高速高负荷工况的要求，重新进行了燃烧系统匹配和优化，如喷油器油束夹角从 146° 改为 150° 。在 1 700r/min 时达到额定功率 280 ～ 320kW，在 1 300r/min 时达到最大转矩 1 900 ～ 2 100N • m，标定工况时的热效率为 43%，这些性能指标都与前述重型车用柴油机不同。在排放控制技术开发上，由于优化了 SCR 转化效率和 EGR 燃烧系统，缸内排出的 PM 可以降低到 Stage4 非道路 PM 限值以下，所以在排气后处理系统中，去掉了 DPF，也去掉了为 DPF 再生用的排气管喷射系统。

3.3 世界内燃机产业技术和产品发展趋势

3.3.1 内燃机产业技术发展趋势

1. 排放法规和油耗法规的持续推动作用

长期以来，政府制定的排放法规和油耗法规是内燃机产业和产品技术发展的主要推动力。在未来的技术发展上法规的持续推动力仍将起到决定性作用。

在排放法规的持续推动力方面，如图 3-3 所示。美国将于 2017 年实施 Tier 3 排放标准，该标准与世界上最严格的加州超低排放标准 LEV3 基本一致，以轿车和轻型车标准为例，NO_X+NMOG（非甲烷有机气体）排放将从 Tier2/Bin5 的 100mg/km 大幅度降低到 Tier3 的 18.7mg/km，下降 81%；PM 排放将从 Tier2/Bin5 的 6.2mg/km 大幅度降低到 Tier3 的 1.8mg/km，下降 71%。在欧洲，欧盟将于 2017 年实施欧Ⅵ第 2 阶段标准（又称欧Ⅵ c 标准），虽然 NO_X、PM、HC 等排放限值没有变化，但是该阶段引入了“实际道路（Real World）”或“循环外

（Off-Cycle）”的排放控制理念，采用了世界统一轻型车循环（WLTC）取代传统的新欧洲驾驶循环（NEDC），作为汽车排放认证的驾驶循环。与 NEDC 相比，WLTC 循环更加符合汽车在实际道路上的运行工况，能够更好地检测到以前 NEDC 认证运行不到的工况区域，使得发动机的排放控制区域扩展到实际道路运行工况范围。此外，在欧Ⅵ第 2 阶段将对缸内直喷汽油机颗粒数量排放的限制加严，PN 限值从第 1 阶段的 6×10^{12} 个 /km 下降到第 2 阶段的 6×10^{11} 个 /km，下降 99% 以上。此外，欧盟正在讨论欧Ⅶ排放法规，预计将于 2019 年实施。虽然欧Ⅶ排放标准的具体限值还没有公布，但是预计排放限值将进一步大幅度下降。就轿车排放来说，预计 NO_X+HC 将从欧Ⅵ的 170mg/km 进一步下降到 90mg/km 左右，PM 排放将从欧Ⅵ的 4.5mg/km（采用 PMP 颗粒测量体系）进一步降低到 0.5mg/km 左右。届时将与美国 Tier 3 限值非常接近，只是两者的排放循环仍然不同。

在油耗（或 CO_2）法规的持续推动方面，图 3-4 给出了主要国家和地区轿车油耗控制目标。美国能源部要求 2020 年重型车柴油机的热效率由当前的 42% 提高到 55%，乘用车汽油机的热效率由 28% 提高到 45%，2025 年美国轻型汽车的平均燃油经济性达到 54.5mpg，相当于 4.4L/100km 或 CO_2 为 102g/km。欧盟于 2009 年颁布了汽车强制性 CO_2 排放法规，要求在 2015 年轿车 CO_2 平均排放小于 130g/km，在 2020 年达到 95g/km 目标（相当于油耗 4.1L/100km），到 2025 年将进一步降低到 70g/km；2014—2017 年轻型商用车的 CO_2 排放比 2007 年降低 14%，2020 年进一步减少 28%，达到 147g/km。日本提出 2020 年乘用车的燃油消耗降低 24%，达到 4.5L/100km 的油耗目标，相当于 CO_2 为 105g/km。印度在 2020 年的油耗目标为 4.8L/100km；中国 2020 年的油耗控制目标为 5.0L/100km。可见到 2020 年，各主要国家的轿车油耗将下降到 4 ～ 5L/100km。在油耗控制方面，欧盟一直是世界的领头羊，经过过去几年的技术进步，欧盟各大汽车公司已经于 2013 年基本达到了欧盟 2015 年 CO_2 排放目标，即 130g/km（如图 3-8 所示，具体的目标值依据车重而变化，如图中虚线所示），但是该目标离 2020 年的 CO_2 目标还有 27% 的差距，降低油耗的任务依然非常艰巨。今后几年，油耗法规的持续推动作用将给内燃机工业的发展带来更为深刻的技术革命。

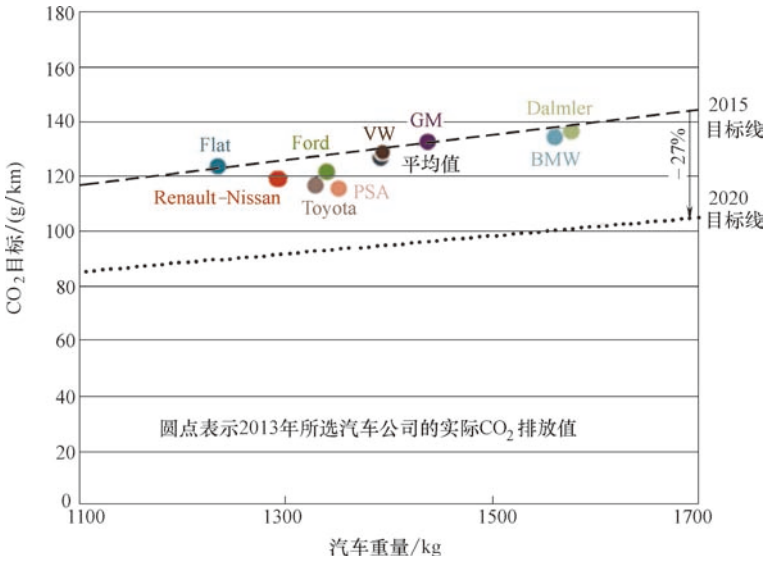


图 3-8　2013 年欧盟各大汽车公司 CO_2 排放目标完成情况

2. 市场和用户的推动作用

世界各国内燃机产业发展非常复杂，虽然政府制定的油耗法规和排放法规是内燃机技术发展的主要推动力，但是来自于市场和用户的推动作用也不能忽视。市场和用户对内燃机产业的影响牵涉到许多因素，如品牌效应和用户消费习惯、政府对节能产品的税收政策、购买成本和维修成本、燃油使用成本、产品可靠性和一致性、维修服务网点和零配件网点等，因此内燃机生产厂商征求用户的意见，改进产品设计，千方百计地为用户着想，扩大市场占有率，提高企业效益。

市场和用户的推动作用还表现为市场和用户需求的多样性上。内燃机作为一个重要的动力装置，广泛应用于交通、工业、农业、林业、矿山等不同领域，应用于具有不同排放法规和油耗法规的国家和地区，以及应用于平原、山区、城市、农村等不同地域，因此内燃机生产厂商必须面对不同层次的用户需求来开发产品和技术，为用户提供更多的选择。在满足排放和油耗法规的前提下，新技术并不一定能够很快地赢得市场，需要一个市场成熟的过程。一个明显的例子就是先进的 GDI 和 TGDI 车用汽油机的发展。如图 3-9 所示，虽然先进的 GDI 和 GTDI 车用汽油机近几年得到显著的发展，传统的 PFI 汽油机的市场占有率正在下降，但

是截至 2015 年，PFI 汽油机仍然占据世界车用汽油机市场的 65% 以上；预测到 2020 年，TGDI 汽油机将占车用汽油机市场的 40%，PFI 汽油机仍然占据市场一半左右的份额。

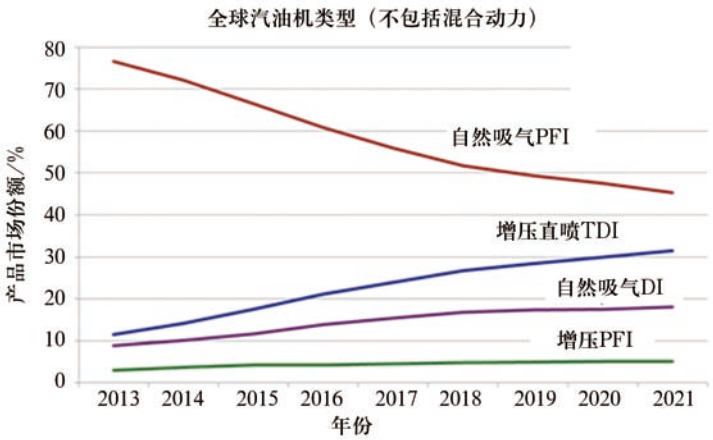


图 3-9　世界 PFI、GDI 和 GTDI 车用汽油机的发展趋势

注：数据来源 :HIS。

为了满足未来排放法规，尤其是油耗法规的要求，乘用车动力已经研究开发了许多新技术，如停缸和可变配气技术、增压直喷和可变配气技术、增压柴油机技术、直喷压燃汽油机技术、全混合动力技术等，但是这些新技术应用以后，对于成本和燃油经济性收益之间的影响关系是不同的（如图 3-10 所示），内燃机生产厂商必须小心掌握成本和节能收益的平衡点，循序渐进地在产品上推出新技术，接受市场和用户的挑选和考验。一个明显的例子就是混合动力和电动汽车的发展，虽然已经经历了近二十年的开发和应用，并且代表未来技术发展方向，满足未来更为严格的油耗法规，但是混合动力和电动汽车并没有赢得更多的市场和用户，市场占有率仍然不足 1%。成本高是主要的发展障碍之一。

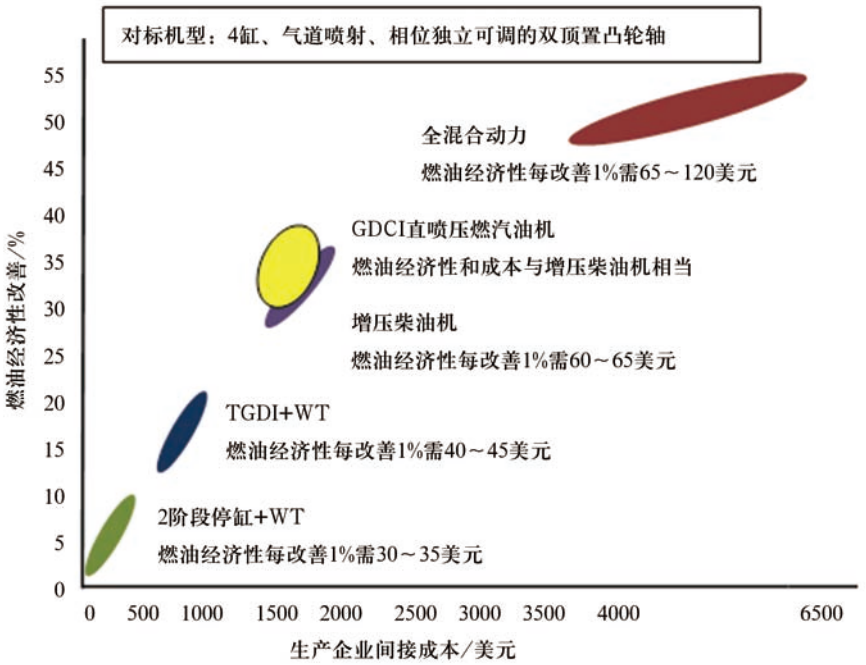


图 3-10　不同的轿车新技术对燃油经济性和成本的影响关系

3. 车用汽油机技术发展趋势

随着排放法规和油耗法规推动，车用汽油机已经采取了缸内直喷、涡轮增压、可变进气相位、小型强化、颗粒过滤器等技术措施，显著降低了汽油机产品的有害排放和提高了燃油经济性。为了满足未来更严格的排放和油耗法规，未来几年，车用汽油机产品还将发展下面的技术：

（1）米勒（Miller）循环和阿特金森（Atkinson）循环　内燃机的热效率取决于膨胀比，较大的膨胀比能提高热效率。但是按照目前的内燃机设计结构，要增加膨胀比就必须提高压缩比，而压缩比的提高受到爆燃的限制。阿特金森循环就是通过改变发动机曲柄连杆的设计，让膨胀比大于压缩比，从而改善燃油经济性。但是实现阿特金森循环的结构设计复杂，已经开发的几种结构设计都没有进入产品应用，未来油耗法规的进一步推动，阿特金森循环或许能够得到实际应用。米勒循环是一种改良的阿特金森循环，它是通过进气门早关或者晚关，降低有效压缩比，实现有效膨胀比大于有效压缩比的目的。米勒循环能够有效降低燃烧温度和压力，抑制爆燃倾向，减少泵气损失。研究表明：在相同的燃烧压力条件下，采用米勒循环能够进一步提高几何压缩比或增压缩比，从而显著提高有效热效率

（BTE，如图 3-11 所示）。

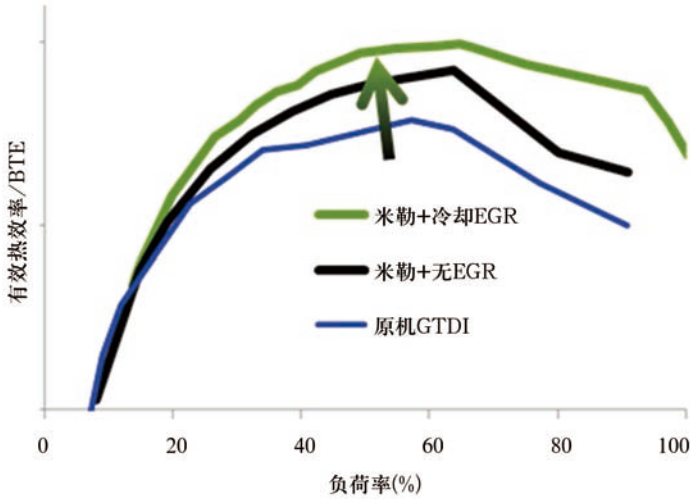


图 3-11　米勒循环和 EGR 对汽油机有效热效率的影响

（2）可变配气相位（VVT）、可变气门升程（VVL）和可变气门型线（VVA）VVT 已经在汽油机上得到广泛的应用，对兼顾高低速和高低负荷性能、特别是改善部分负荷燃油经济性起到了明显的作用。但是，汽油机由于采用节气门调节负荷，所以部分负荷泵气损失很大，这是汽油机燃油经济性差的主要原因之一。采用 VVL 和 VVA 以后，可以通过气门运动来控制进气流量，去掉节气门，从而极大地改善部分负荷的燃油经济性。此外，VVL 和 VVA 能够比 VVT 在更宽广的转速和负荷范围内优化充气效率，减少泵气损失，从而进一步提高热效率和燃油经济性。VVL 已经在一些机型上得到应用，未来几年 VVA 在克服了控制和成本的难题以后，也将开始在汽油机上应用。

（3）带冷却的 EGR 系统　作为降低 NO_X 的主要技术措施之一，EGR 在柴油机上已经广泛应用，但在汽油机产品上还很少应用。带冷却的 EGR 系统的主要作用是：降低 NO_X 排放、提高热效率、减少爆燃倾向、减少泵气损失。因此，在汽油机上应用 EGR，既可以降低 NO_X 排放，也可以同时提高热效率，改善燃油经济性（如图 3-11 所示）。但是，一般汽油机燃烧系统容许的 EGR 比率较低（不超过 15%），要想进一步提高 EGR 比率，就必须提高燃烧系统的稀燃能力，因此，提高点火能量、优化燃烧系统、提高稀燃界限是应用 EGR 的关键。

（4）分层稀燃　分层稀燃是提高汽油机热效率的有效措施，但是由于长期以来没有开发出一个适合于分层稀燃的高效后处理器，所以分层稀燃的有害排放仍然满足不了严格的欧Ⅴ和欧Ⅵ排放法规要求。未来随着油耗法规的推动，将会研制适合于分层稀燃的高效后处理器，使得分层稀燃技术取代目前的均质燃烧系统，充分发挥分层燃烧在降低燃油消耗方面的作用。

（5）高压缩比和可变压缩比　提高几何压缩比就能够提高热效率，但是汽油机由于受到爆燃的限值，几何压缩比一直较低（12 以下），尤其是直喷增压汽油机。通过上述米勒循环、冷却 EGR、分层稀燃，以及提高燃料辛烷值等技术措施，可以比较显著地提高压缩比。汽油机爆燃容易发生在高速大负荷工况或者低速大负荷工况，而在部分负荷工况下，由于喷油量小，燃烧温度和压力低，不产生爆燃，因此可以在部分负荷工况采用更高的压缩比，而在大负荷工况采用较低的压缩比，这样就形成了可变几何压缩比技术方案。可变压缩比可以显著地改善部分负荷燃油经济性，过去曾经被广泛研究和开发，但由于机构的复杂性，迄今还没有在产品上得到应用。FEV 咨询公司已经开发了一个偏心的、具有液压驱动的特殊连杆结构可以在发动机实际运行中改变压缩比。在未来更严格的油耗法规推动下，可变压缩比技术将会受到进一步重视和开发。

（6）低温燃烧技术　均质压燃和低温燃烧技术已经得到了广泛的研究，采用大比率的 EGR 和多次燃油喷射技术实现汽油的可控自燃着火，显示出非常低的 NOx 和 PM 排放。未来的低温燃烧技术将充分利用不同燃料特性和化学反应动力学来控制混合气自燃和燃烧放热速率，低温燃烧运行区域将显著拓展。德尔福公司目前已经开发出了直喷压燃汽油机（GDCI）样机，排放和油耗均得到大幅度改善。随着 Tier 3 和欧Ⅶ排放法规的实施，低温燃烧技术和方法将会克服产品化的技术难题，应用于高效清洁汽油机产品上。

（7）停缸技术　停缸技术是指在部分负荷运行时停止向某一些气缸喷油，以减少燃油消耗，同时关闭这些气缸的进排气门，以减少换气损失；当负荷提高以后，再恢复正常的喷油和气门运动。停缸技术原理虽然简单，但是牵涉到气门控制、发动机曲轴扭振、停缸后的进气量和喷油量变化、整车驾驶性等问题，目前在 6 缸以上的大型发动机产品上有应用，但是在小型 3 缸和 4 缸车用汽油机产品上还鲜有应用。宝马、福特、博世、AVL 等公司已经在研究和开发乘用车停缸技术，未来这一技术必将像起动—停车、制动能量回收系统一样，成为乘用车的必要配置。

（8）增压技术和小型强化　目前增压直喷汽油机及其小型强化（Downsize）已经成为车用汽油机的发展趋势，Downsize 新产品开发越来越多，带来燃油经济性 5% ～ 10% 的改善，未来还将继续进行 Downsize 机型的开发，以满足更加严格的油耗法规。未来的 Downsize 机型，除了采用更高的增压压缩比（从目前的 2.5 提高到 3.0 以上）或二级增压（机械增压 + 涡轮增压或者 2 级涡轮增压）以外，还将同时采用上述的米勒循环、冷却 EGR、VVL 或 VVA 等技术，使得 Downsize 机型不仅实现更高的功率密度（将达 110 ～ 140kW/L），而且在部分负荷具有非常高的热效率。

4. 车用柴油机技术发展趋势

柴油机用途广泛、热效率高。但是要达到未来的排放法规和油耗法规，还需要开展大量的技术开发，其中最重要的是燃油经济性。正如美国“超级载货汽车”研究计划中提到的那样，未来要将有效热效率从目前的 42% 提高到 50%, 然后再进一步提高到 55%。未来柴油机产品将会在下面几个方面取得技术进展：

（1）增压及动力强化　轻型车用柴油机小型强化（Downsize）和重型车用柴油机的降速强化（Downspeed）已经得到了很好的发展和应用，未来还将进一步得到发展，开发更多的动力强化机型。轻型车用柴油机的功率密度将进一步提高到 90 ～ 120kW/L，其中涡轮增压将更多地采用二级增压系统，以提高增压比、提高低速转矩、改善瞬态加速响应、兼顾高低速和高低负荷性能。重型车用柴油机的转速将维持在 1 800 ～ 1 900r/min，通过可变截面增压或二级增压，一方面提高转矩，另一方面将最大转矩对应的最低转速降至 1 100r/min 左右，改善重型车辆的低速性能。

（2）提高燃油喷射压力　为了实现更高的动力强化，显著降低 PM 和 NO_X 排放，燃油喷射压力将进一步提高。功率密度为 90 ～ 120kW/L 的轻型车用高功率密度柴油机的喷油压力将从目前欧Ⅵ机型要求的 200 ～ 240MPa，提高到 250 ～ 300MPa；重型车用柴油机的喷油压力也将从目前欧Ⅵ机型的 200 ～ 220MPa 提高到 240 ～ 280MPa。在这样的超高喷射压力下，燃油的喷雾特性、蒸发和混合规律、燃烧放热过程都将发生重要变化，需要深入研究。

（3）新型材料和结构　为了实现更高动力强化，要求发动机材料和结构能够允许的最大爆压大幅度提高到 25 ～ 30MPa，承受的平均有效压力达到 2.5 ～ 3MPa，这为发动机材料、结构强度和刚度提升提出了更高的要求，包括活塞、缸盖、缸体、气门、缸套和活塞环等，未来围绕动力强化的要求将进行更多

的新型材料和结构的研究和开发，并常常与降低摩擦副的摩擦损失一起来考虑。

（4）可变配气技术　可变配气技术虽然在汽油机产品上广泛应用，但一直没有在柴油机产品上得到应有，其主要原因是：柴油机的泵气损失较汽油机低得多（尤其在部分负荷工况），因此，柴油机 VVT 并不能带来像汽油机 VVT 那样大的燃油经济性收益；此外，由于结构的差异，柴油机 VVT 的相位调节范围比汽油机 VVT 小。但是，近年来，柴油机 VVT 技术已经得到大量研究，并已经开始应用于柴油机产品。主要是因为，采用 VVT 可以非常方便地在缸内积存较多的残余废气（即内部 EGR），这样在起动、暖机和排气温度较低的工况时，可以有效降低 NO_X 排放，弥补了在排气温度较低时 SCR 转化效率低的缺陷。FEV 咨询公司在开发 105kW/L 高功率密度柴油机样机时，采用了可变升程（VVL）技术，并在进气门阀座处设计了一个定向开口槽；在低速低负荷时气门升程减小，进气气流在定向开口槽的作用下在缸内形成了较强的涡流运动，极大地改善了低速低负荷时的排放和燃油经济性。由此可见，柴油机可变配气技术能够实现排放和燃油经济性的综合优化，未来将在更多的柴油机产品上得到应用。

（5）米勒循环技术　米勒循环技术在车用汽油机和燃气发动机上研究较多，并且已经有产品应用的实例，未来还将进一步开发和应用。米勒循环在柴油机上的应用也开始受到重视，主要是用于高强化柴油机上，利用米勒循环有可以降低燃烧温度和压力的优点，在保持相同功率输出的条件下，显著降低发动机的机械负荷和热负荷。此外，与可变配气（VVT、VVL、VVA）技术相结合，也可以改善部分负荷的燃油经济性。

（6）废气能量利用　在重型柴油机上研究朗肯循环系统，充分利用废气能量、冷却水热量和 EGR 热量，能够提高有效热效率 5% ～ 8%。虽然朗肯循环已经在船用和发电用柴油机上得到应用，但是由于系统复杂、体积增加、成本较高，目前在重型商用车产品上还鲜有应用。但是由于其可观的燃油经济性收益，未来将加大研究和开发力度，力争在重车产品上得到应用。

（7）先进燃烧技术　在柴油机燃烧技术上，未来将主要开展两方面的工作：第一、由于柴油机产品持续的动力强化，其燃烧系统需要在更宽广的转速和负荷范围内进行仔细设计和匹配，包括更高的喷油压力、二级增压、更宽广的 EGR 区域、可变配气、排气温度等的匹配和标定。因此未来柴油机燃烧系统将更加复杂，需要更加仔细地优化和标定。第二、新型低温燃烧技术的研究。运用多次喷射、EGR、VVT 和 VVA、多种燃料等措施，在柴油机上实现低温燃烧过程，实

现非常低的 NOx 和 PM 排放，满足欧Ⅶ排放要求。低温燃烧技术是非常诱人的，行业未来将加大研究力度，争取在产品上得到应用。

（8）热管理技术　和汽油机相比，柴油机的热管理系统更加复杂，因为柴油机采用了高压和低压 EGR 系统、有复杂的 DPF 和 SCR（或 LNT）后处理系统、还可能采用朗肯循环系统，所以在柴油机上开展热管理研究，优化冷却系统和热量分配，将是未来重要的技术发展之一。

5. 轻度混合动力技术发展

混合动力技术已经发展了近 20 年，在乘用车上已经得到了较好的应用，但是市场占有率仍然很低，主要原因在于目前的混合动力所采用的电池组体积很大，电压高达数百伏，虽然比传统的汽油车和柴油车具有一定的燃油经济性优势，但是其成本高，失去了用户的青睐。目前 AVL、Ricardo、Bosch 等咨询公司和零部件生产商，以及德国宝马、奥迪、戴姆勒、大众等汽车制造商都在开发和推广轻度混合动力（Mild Hybrid）技术。该技术仍然基于汽油机或柴油机，只是将发动机上的蓄电池、电动机和起动机等电气系统的电压从一般的 12V 提高到 48V。改用 48V 电压以后有诸多好处，例如电气系统的效率提高、起动—停车和制动能量回收等微混合动力技术将可以在更高的功率（6 ～ 12kW）下有效工作、电机驱动曲轴的转矩更大、冷起动转速更高、比目前数百伏的混合动力安全性更高等等，特别对于 CO_2 排放或燃油消耗的作用更显著，能够降低燃油消耗 10% ～ 15%。48V 轻度混合动力的改造成本包括更换蓄电池、电动机、发电机、用电设备等，改造成本比全混合动力低得多，能够满足用户需求。在未来几年，48V 轻度混合动力技术或许能够像起动—停车技术一样，在乘用车产品上得到推广应用。

3.3.2　内燃机产品和产业发展趋势

随着内燃机技术的进一步发展，内燃机产品和产业发展将出现下列特点：

1. 轿车和轻型车用发动机平台和型谱将大大简化

由于轿车和轻型车用发动机采用了小型强化（downsize）技术，发动机的排量和体积显著缩小，但是功率覆盖范围并没有降低，所以造成了较小排量的发动机可以取代较大排量的发动机，装备在原较大排量发动机的汽车平台上，这样不仅可以把以前较大排量的发动机从平台中去掉，大大简化了新产品的型谱，另外也促进了发动机模块式开发。许多汽车厂家开发了排量为 1.0L 左右的 3 缸发动机（包括汽油机和柴油机），并以此作为一个基本平台，在缸径、冲程、连杆长

度等基本结构参数不变的情况下，拓展为 4 缸、6 缸等，覆盖更大的功率范围。这种模块化设计保持了发动机的基本设计参数不变，只是气缸数的增加，最大限度地共享零部件和设计技术，实际上是基于一个平台来开发不同缸数的发动机，大大节约了开发成本、制造成本和服务成本。如图 3-12 所示，大众汽车公司以原来 1.0L 多点气道喷射式汽油机（1.0L MPI）为基础，采用小型强化技术开发了 3 缸 1.0L 直喷增压汽油机（1.0L TSI）。由于大大提高了功率密度，新 1.0LTSI 汽油机的功率与以前采用多点气道喷射式 1.6L MPI 汽油机及 1.2L TSI 汽油机的功率相当，完全可以取代这两种机型。该 3 缸 1.0L TSI 汽油机，可以通过模块化设计扩展到 4 缸发动机，形成 1.4L TSI 汽油机，满足更高的功率需求。这样，大众 Polo 轿车的发动机型谱将由原来的 1.0L MPI、1.4L MPI、1.6L MPI 和 1.2L TSI 四种汽油机型简化为 1.0L MPI、1.0L TSI 和 1.4L TSI 三个汽油机型。而且这三个机型的汽油机具有相同的缸径、冲程和基本结构，属于一个发动机平台，因此发动机平台和型谱被大大简化了。同时，Polo 轿车的平台也将随发动机体积的缩小而进行合并和简化。

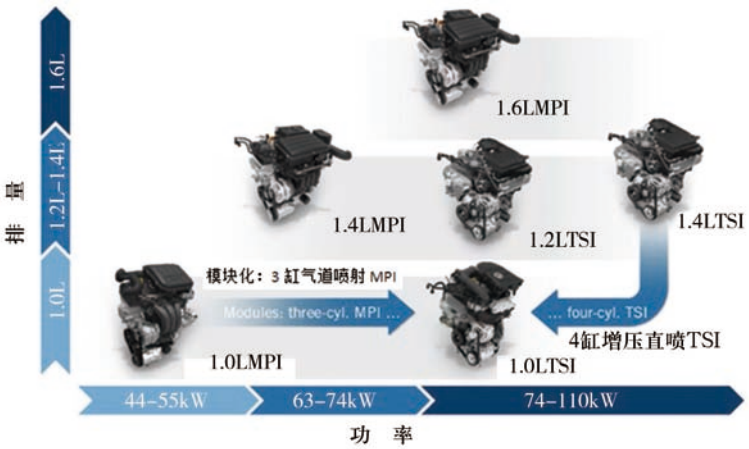


图 3-12　大众 Polo 轿车汽油机平台和型谱变化

福特汽车公司近年来开发了 EcoBoost 系列直喷增压汽油机，采用模块化设计方法在 3 缸 1.0L 基础平台上，扩展 4 缸 1.3L 和 6 缸 2.0L 机型，成为福特旗下 Fiesta、Fusion 和 Focus 轿车的主要动力，平台和型谱大大简化。其他汽车公司（通用、丰田、本田、雷诺等）近年来也纷纷开发 1.0L 左右的 3 缸小型强化汽油机或柴油机，都是为了通过模块化的设计方法取代原来众多的发动机型，简化平台和型谱。未来这一趋势将继续发扬光大。

2. 小型和微型乘用车将得到大力发展

如图 3-4 所示，世界各国对于未来汽车油耗的控制目标是非常严格的。车用内燃机要达到 2020 年油耗目标，其有效热效率必须提高 10% ～ 30%；要达到 2025 年油耗目标，需要其有效热效率再继续提高 20% 以上。然而，内燃机有效热效率的提高是比较困难的，即使采用 3.3.1 节所述的技术措施，内燃机有效热效率的提高也仍然无法满足各国汽车油耗法规的要求。但是已经证明，汽车小型化和微型化是降低汽车油耗的有效措施。在图 3-4 中油耗控制最好的三个国家和地区中，欧洲采用“大量排量为 1.6L 以下的小型车 + 50% 左右油耗更低的柴油车”保持了全社会较低的汽车平均油耗；日本则大量采用“排量为 0.6L 左右的微型车 + 20% 左右的混合动力车”保持了全社会较低的汽车平均油耗；印度在汽车油耗控制技术上并没有采取强有力的措施，但是依然以其大量排量为 0.5 ～ 0.8L 的微型车，支撑了全社会较低的汽车平均油耗。实际上，目前汽车小型化和微型化的发展趋势在国外已经非常明显了，随着油耗法规的进一步实施，在未来的汽车市场上，将会出现更多的小型车和微型车产品。而在我国，由于传统消费观念的影响，广大的汽车消费者依然热衷于购买中大型和运动型轿车，造成了全社会居高不下的平均油耗，这一汽车消费观念必须改变。总之，车用内燃机的小型化和微型化发展在所难免，主要表现为成本较低的小型汽油机（排量为 1.0 ～ 1.2L）和微型汽油机（排量为 0.6 ～ 0.8L）将会在未来几年有一个显著的发展和市场占有率。

3. 关键零部件及材料发展趋势

围绕提高内燃机可靠性以及燃油经济性提高方面，近年来，国内外汽车内燃机材料正在向高性能、轻量化、耐高温、耐腐蚀方向发展。先进的金属材料主要应用在内燃机的缸体、缸盖、曲轴、排气歧管、凸轮轴等重要零部件上。

（1） 内燃机缸体、缸盖发展趋势　随着发动机轻量化、功率的提高以及节能减排的大趋势所向，无论是国外还是国内自主乘用车发动机气缸体和气缸盖逐渐实现从铸铁向铸铝方向的转变，甚至更轻的镁合金也出现在了少数车型中；对于商用车而言，国内外的大功率柴油发动机气缸体、气缸盖都正在向更高强度发展，使用的材料已从 HT200 发展到 HT250 和 HT300，并已形成产业化，新材料和新工艺的研发也在积极进行中。

1）国外乘用车缸体、缸盖总体概况。就乘用车而言，日系车的发动机气缸体和气缸盖几乎全线完成了向铝合金转变，大众经典的 EA111 也由铸铁气缸体 +

铸铝气缸盖转变为 EA211 的全铸铝结构（图 3-13），EA888 系列发动机完成全铸铝结构化也似乎成为必然；即使在商用车领域，甚至某些重型载货汽车也在考虑将气缸体铸铝化，沃尔沃某款重型载货汽车已经搭载了铸铝气缸体的发动机。

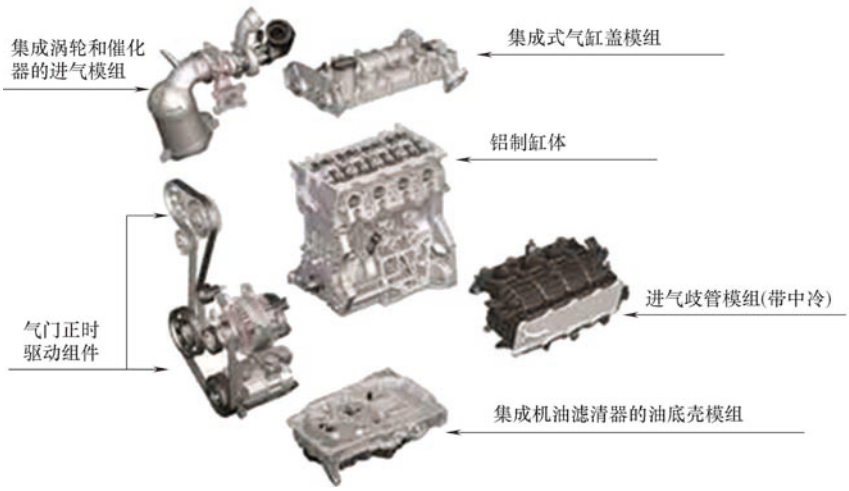


图 3-13　大众 EA211 发动机拆机图（全铝发动机）

纵观德系、美系甚至是很多自主品牌乘用车车型，涡轮和机械增压已经并非“高科技”，即使是坚守自然吸气和混合动力的日系品牌也有部分车型搭载了增压技术发动机。增压技术的介入使得发动机的爆破压力大幅度提高，因此，对气缸体的强度也有了更高的要求。铸铝气缸体为了更好地满足使用需求，对提高强度更加有效的处理工艺是不可或缺的，同时与之相配合的铸铁气缸套强度也需要有一定的提高。

2）国外商用车缸体、缸盖总体概况。对于商用车而言，随着功率和转矩的不断提高以及节能减排指标的日趋严格，大功率柴油发动机气缸体、气缸盖已拓展到 HT250 甚至是 HT300 水平，由于更高牌号的灰铸铁铸造性能目前还有瓶颈需要突破，国外的多家汽车公司已成功采用蠕墨铸铁制造发动机的气缸体、气缸盖，某些主机厂已经量产。

（2）内燃机曲轴发展趋势　国外的曲轴材料主要有调质钢曲轴、非调质钢曲轴、球墨铸铁曲轴、铝合金复合材料曲轴。

调质钢曲轴材料属于出现较早并且应用广泛的曲轴材料。这类曲轴材料需要采用调质（或正火）热处理来提高强度并改善加工性能。锻造曲轴由于需要热处

理，工艺较复杂，能源消耗较大。为此，国外常利用锻造余热淬火的技术，来增加淬透性，提高硬度、抗拉强度、冲击韧度和断后伸长率，从而降低毛坯成本的方法。如图 3-14、图 3-15 所示。

图 3-14　调质钢锻造曲轴

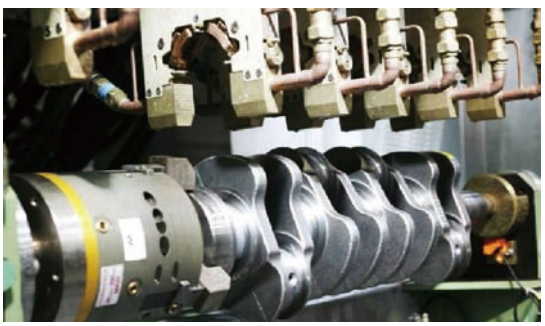


图 3-15　锻造曲轴感应淬火

微合金非调质钢曲轴是近年来发展起来的新型曲轴材料，国外汽车应用微合金非调质钢曲轴已十分广泛，德国的奔驰、意大利的菲亚特、美国的福特、日本的三菱和丰田等汽车公司都有部分汽车发动机曲轴采用非调质钢。其优点是可省去调质（或正火）处理工艺，具有明显的简化工艺、节时节能效果，顺应环保趋势。

球墨铸铁比钢轻约 10%，无残余应力。国外球墨铸铁曲轴使用比例较高，一般轿车用直列四缸曲轴，基本实现了用铸铁代替锻钢。其中意大利菲亚特汽车公司开发的 GH90-5 球铁曲轴，经过正火处理，实现了较高的综合性能。如图 3-16、图 3-17 所示。

图 3-16　球墨铸铁曲轴

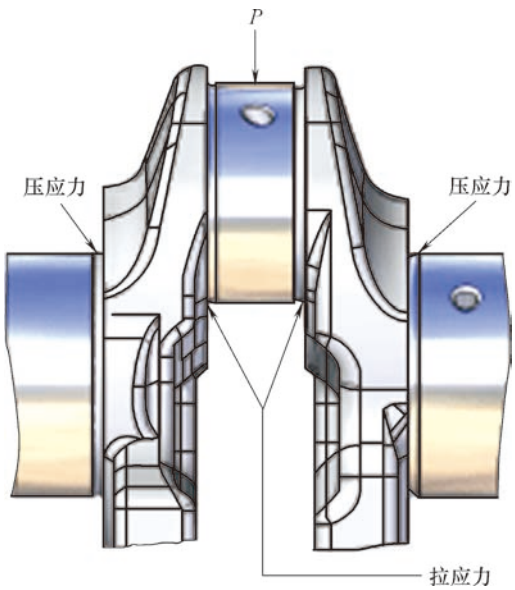


图 3-17　滚压圆角受力情况

奥氏体等温淬火球墨铸铁（ADI）材料是近年来在铸铁冶金中的重大发现，其具有高强度、高韧性、耐疲劳和耐磨性能，因此是一种非常有发展前途的材料，在国外汽车曲轴中已有应用。

目前，国外采用新型铝合金复合材料来代替传统材料，以实现轻量化。压力铸造纤维和颗粒增强铝合金复合材料制造曲轴可能成为未来的发展趋势。

（3）内燃机凸轮轴发展趋势　最近几年国外凸轮轴制造行业发展迅速，凸轮轴制造技术发生了剧烈的变革，主要表现为装配式凸轮轴的快速发展。国外汽车集团如宝马、大众等公司的汽车产品均已采用装配式凸轮轴。装配式凸轮轴的制造工艺是：轴管、凸轮片等零件单独加工和热处理，然后通过装配工艺将各零件串在轴管上，并保证凸轮片等零件的相对角度和装配接合的疲劳强度。这类新型的凸轮轴具有轻量化、成本低等优点。目前国外的装配式凸轮轴供应商主要有蒂森克虏伯和马勒等。装配式凸轮轴主要技术和专利掌握在国外供应商手中，由

于技术壁垒，国内的凸轮轴供应商无法生产这类产品。

装配式凸轮轴的材料选用具有多样化特点，通过采用不同材料既降低材料成本，又提高了材料性能和凸轮轴性能。目前，国外装配式凸轮轴的材料选用如下：

1）凸轮片。100Cr6（相当国产材料的 GCr15），为高碳铬钢。优点：淬火后表面硬度 60 ～ 65HRC，耐磨性好。缺点：材料成本高，加工及热处理工艺繁杂；粉末冶金，D11/D36（DIN 标准牌号，无相应的国产牌号）。硬化处理后表面硬度 45 ～ 55HRC。优点：粉末冶金烧结成形接近精密成形，节省材料。但是国内的粉末冶金标准落后，粉末冶金行业基础较差。

2）轴管。碳素钢（相应国内材料可用 45 钢）。

3）正时靶轮。粉末冶金或碳素钢。

4）轴端件。44SMn28（相当国内材料 F45MnVS），易切削非调质钢。优点：机加工性能好，不需调质处理，节约成本。

（4）柴油机电控燃油系统发展趋势　在国际上，柴油机电控燃油喷射系统的发展历经了位置控制式电控燃油喷射系统、时间控制式电控燃油喷射系统、时间和压力控制式的共轨系统三代产品。

第一代是位置控制式电控燃油喷射系统，德国博世公司的 VP37 全电控 VE 泵是唯一曾经批量生产的位置控制式电控燃油喷射系统，它通过旋转电磁铁控制柱塞滑套位置来闭环控制喷油量，并通过电磁阀控制喷射提前角。

第二代是时间控制式电控燃油喷射系统，以控制电磁阀通电时间来控制喷油量和喷油提前角。目前最常见的是电控单体泵和电控泵喷嘴，至今仍然有广泛的应用。

第三代是高压共轨系统，是从 20 世纪 90 年代开始发展起来的新一代柴油机燃油喷射系统，并且很快取代了直列泵、电控 VE 分配泵、电控单体泵、泵喷嘴等燃油喷射系统，成为主流技术路线。瑞士苏黎世联邦理工学院（ETH）1983 年发表了高压共轨系统的研究论文，这是全世界的第一代高压共轨技术。基于此研究成果，1997 年德国博世公司生产出第一代高压共轨产品，批量应用于 Mercedes -Benz C 220 轿车的 CDI 柴油机，之后博世高压共轨系统成为乘用车和商用车批量配套主流燃油喷射系统。高压共轨系统对喷射压力和多次喷射控制两大优势是柴油机提高缸内净化效率、减少有害排放产物的主要措施，被称为 20 世纪内燃机技术的三大突破之一。

瑞士苏黎世联邦理工学院在完成第一代共轨技术研发后，继续进行深入的研究探索，2001 年发布了第二代高压共轨技术。第二代高压共轨技术在喷油器上

采用了中孔蓄压结构，减少喷射回油量，同时避免油嘴针阀偶件卡滞的故障；在高压油泵上采用了柴油强制润滑方式，使高压油泵设计压力具有 220MPa 的许用潜力，避免了轻型柴油机润滑方面可能出现的柴油泄漏稀释机油以致损坏发动机的故障隐患。这些技术特点已经体现在德国博世公司 250MPa 满足欧Ⅵ标准的高压共轨产品中。

目前欧洲已实施欧Ⅵ第二阶段排放法规，燃油系统的技术路线统一为具有绝对性能优势的电控高压共轨系统，普遍采用系统压力达 220MPa 以上，电磁阀的响应时间达到 0.2ms，主预喷间隔可达到 0.1ms，每循环最多可实现 9 次喷射。匹配乘用车和轻型商用车产品可靠性 B10 寿命达 50 万 km，匹配重型商用车 B10 寿命达 120 万 km。

（5）内燃机排气歧管发展趋势　随着汽车排放法规的不断升级，发动机燃烧效率的不断提高，气体排放温度也在持续上升，有时接近甚至超过 1 000℃。对排气歧管用材料的耐氧化性、耐热变形性及耐热裂纹性等热疲劳性能提出了更高要求。传统耐热铸铁材料（工作温度范围 600 ～ 950℃）难以满足新情况下排气歧管的使用要求，国内外开始探索耐热铸钢材料和焊接的耐热不锈钢管在排气歧管上的应用。前者国外较早致力于研发耐热铸钢材料在排气歧管上应用的企业有日立、通用、威斯卡特、丰田、现代等。后者在自然吸气的高强化汽油机上，利用其热惯性低的特性，减少发动机在冷起动时的有害气体排放。

日立金属株式会社在 2007 年之前就着手研发耐热铸钢材料在排气歧管上的应用，并申请多项国际专利。该公司根据排气歧管工作特性及使用温度的不同，开发出 HERCUNITE-S 系列耐热铸钢（适用温度范围 750 ～ 1 050℃）和 HERCUNITE-N/MX 系列耐热铸铁材料（适用温度范围 650 ～ 850℃），见图 3-18，以满足发动机不同气体排放温度对材料的使用要求。

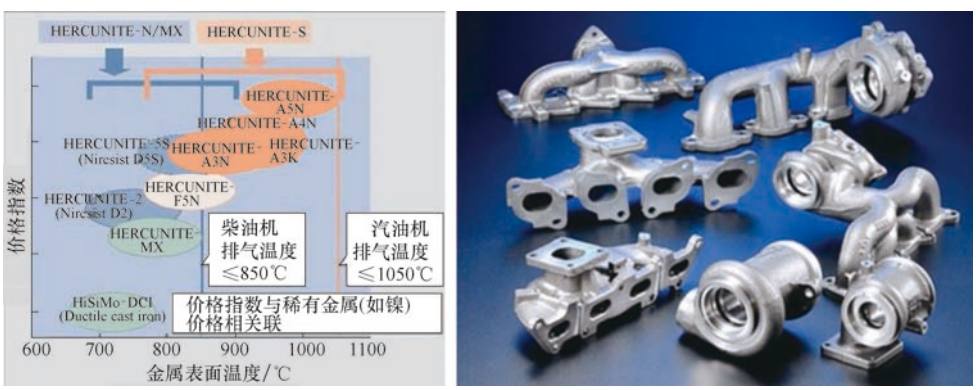
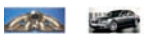


图 3-18　日立“HERCUNITE”系列耐热铸造合金材料及部分产品

美国通用汽车于 2000 年颁布实行《Cast Stainless Steel for Exhaust Components-GMW3164》材料标准。该标准对排气歧管用铸造不锈钢的材料牌号、化学成分及性能等方面进行规定。通用 Sierra 2500/3500 系列皮卡 8.1L 发动机采用了耐热铸钢排气歧管。

威斯卡特作为世界上最大的轿车与轻型载货汽车铸铁排气歧管、涡轮增压器壳体及排气系统的生产企业，也对排气系统用耐热铸钢材料进行深入研究并进行产品推广，其产品应用见表 3-5。

表 3-5　威斯卡特排气系统用耐热铸钢材料应用情况

车企	车型 / 机型	材质	图示
BMW	5/6/7 系、X5/X6	1.4837+1.5%Nb	
Audi	A4、A6	1.4848+1.5%Nb	
Chrysler	Chrysler 300	1.4740+W	

日本大同特殊钢、丰田汽车、爱信高丘、韩国现代、美国博格华纳等公司通过材料成分优化，分别开发出各具特色的耐热铸钢材料并取得较好应用。

4. 高效密封、低摩擦技术

（1）先进非金属材料　随着非金属材料在内燃机上应用越来越多，促进了高性能塑料、橡胶、热塑性弹性体、密封垫片等行业的发展，尤其是耐高温、高强度的复合材料和工程塑料发展尤其迅速。聚酰胺和 SMC（玻纤复合）、LFT（纤维增强）等复合材料代替金属材料制造内燃机用进气歧管、油底壳、气缸盖罩盖、水室、水泵叶轮、风扇、齿轮、油泵、挡油盘等零件，能够实现降重 10% ～ 50%，并且达到减振降噪的效果。采用塑料和复合材料代替金属，还能够集成多个零件一次性成型，实现模块化设计，加工简单，节省空间，降低制造和安装成本，因此发展很快，逐渐成为流行趋势。

20 世纪 60 年代，国外内燃机开始采用非金属材料制造壳体等零件，当时也是聚酰胺等材料技术发展的活跃期，但是非金属材料的耐高温性能还不能满足内燃机内部使用的要求，注射工艺和焊接工艺也无法满足大型复杂零件成型的要求。受非金属材料技术和工艺技术发展限制，直至 20 世纪 80 年代，结构复杂的大型塑料件，如进气歧管、油底壳等才逐渐取代金属件，大批量生产和使用。

1）非金属内燃机进气歧管。进气歧管是汽油机进气系统的重要零件，决定着发动机进气效率和各个气缸的充气均匀性，影响发动机的动力性、环保性和经济性。进气歧管是形状复杂的大型中空零件，其上连接十余个小零件，如支架、节气门、阀、传感器、通风管等等。相对铝合金进气歧管，非金属进气歧管可以降重 40% 左右，降低成本 20% 左右，而且内壁光滑，提高进气量和进气效率，降低噪声，降低油耗，而且设计自由度大。

国外先进国家轿车 95% 都采用塑料进气歧管，但由于结构设计和计算分析复杂，尤其是可变进排气歧管技术和配备电控可变进气阀等复杂的内部控制机构的进气歧管的设计技术只有少数几个国家掌握。塑料进气歧管首选的材料为聚酰胺 6 或 66，添加 25% ～ 35% 的玻璃纤维。对材料的要求为耐高温、强度高、尺寸稳定性好、耐化学溶剂性能好等。

20 世纪 80 年代最先开发出来的进气歧管采用热熔芯（又称为消失模铸造技术）技术，用低熔点的合金制成一个芯，围绕合金芯将聚酰胺工程塑料注射到模具中，将注射成型的进气歧管放入高温的油浴中，熔化掉合金芯。热熔芯技术可以实现无缝单片的塑料进气歧管的设计，产品抗爆裂能力高，但是成本太高，工艺难度大。1990 年，宝马公司首先成功采用熔芯法生产进气歧管。几年后，焊接成形的技术逐渐成熟，利用振动焊接设备将二片或更多片注射成型的外壳焊接在一起。焊接技术成本相对较低，成形周期较短，但必须保证焊接面是平面，并且存在多余的焊接边缘。目前，激光焊接技术应用于进气歧管的制造正在研发之中，已经有成功的案例，但还没有大批量应用。

2）非金属的内燃机罩盖及油底壳。20 世纪 90 年代初欧美国家开始使用塑料发动机罩盖和塑料油底壳。发动机罩盖分为装饰盖和气门室罩盖。装饰盖一般采用 20% 玻璃纤维增强的聚酰胺 6 或 66，应用比较早。而承受更高温度、更大压力和振动力的气门室罩盖多数采用 25% ～ 35% 玻璃纤维增强的聚酰胺 6 或 66，材料耐高温和高强度，相对铝合金产品，可以降重 20% 以上。

油底壳的结构更加复杂，开始时也采用 25% ～ 35% 玻璃纤维增强的聚酰胺 6 或 66 制造，可以集成多个零件，相对钢板冲压的油底壳可以降重 40% 以上。但是油底壳需要承受冲击力，结构设计和材料性能都需要达到更高的强度，而且要求材料耐机油性能更好。

发动机罩盖及油底壳都属于大型零件，装配面的平面度是保证其密封性能的重要参数。而注射成型的塑料制品会有一定翘曲，发达国家在 20 世纪 90 年代末

就掌握了通过计算分析修整模具达到“反翘曲”目的的技术，并成功应用。目前，国外发达国家发动机应用塑料发动机罩盖及油底壳达到 60% 左右，其中 70% 以上是聚酰胺材料注射成型，30% 左右为 SMC、GMT（玻纤聚丙烯复合）等复合材料模压成型。

目前，发达国家塑料发动机罩盖可以集成曲轴箱通风系统、空气滤清器、进气歧管、压力调节阀、油气分离器等形成较大模块，显示较高技术水平。油底壳也能够集成机油滤清器、机油冷却系统、挡油板、存储器、油水分离器、油泵、吸油管、滤网、油道、放油口等多种零件，可以进行大模块化设计，产品集成度非常高。

3）非金属的内燃机进气管路。涡轮增压发动机的进气管路比较复杂，其中涡轮增压出气管是高温高压管路，使用温度 160 ～ 250℃，压力比较高，承受高温油气侵蚀。由于管路必须有减振段软管，一般采用硅橡胶复合胶管。为了阻挡油气侵蚀，胶管内衬一层氟橡胶或氟硅橡胶。氟橡胶耐油性好，但与硅橡胶黏接困难，国外材料供应商，如杜邦公司、大金公司、苏威公司等都有成熟的技术可以实现氟橡胶与硅橡胶的黏接，因此硅橡胶复合胶管耐油性优异。为了承受高温高压，国外硅橡胶复合胶管采用 3 ～ 5 层芳纶布作为增强层。硅橡胶复合胶管的生产工艺为缠绕模压，国外可以实现半自动化或全自动化生产。胶管厚度一般为 2.5 ～ 4mm，管体柔软，刚度低，减振性能优异。硬管可以采用不锈钢管、铸铝管，也可以采用塑料管代替金属管。目前，国外材料生产商，如杜邦公司、EMS 公司、阿科玛公司、巴斯夫公司、朗盛公司等，都开发出耐高温玻璃纤维增强的聚酰胺材料，耐高温达到 200℃以上，短期可以在 220℃下使用，因此聚酰胺管发展很快，逐渐取代金属管，成为新车型高温高压管的主选。聚酰胺管可以注射之后焊接成形，耐高温高压性能优良；也可以吹塑成型，但耐高温高压性能差一些，可以根据发动机涡轮增压系统的温度和压力进行选择。

空滤器进 / 出气管路、涡轮增压进气管路、中冷器出气管路等，相对温度和压力低一些，国外目前采用的方案有三种：一种为金属—橡胶复合管路，橡胶管采用硅橡胶管或 AEM、ACM、CR 等橡胶管，价格比较高，是传统的结构形式；第二种为热塑性弹性体一体化管路，采用 TPEE、TPV 等热塑性弹性体材料，经过软 / 硬段复合，三维吹塑成型一体化管路，相对金属 - 橡胶复合管路，可以降重 50% 左右，成本相对较低；第三种为最近几年发展起来的聚酰胺复合管路，

通过聚酰胺软 / 硬段复合，三维吹塑成型一体化管路，相对金属—橡胶复合管路，可以降重 50% 左右，成本相对较高，但是耐压力性能比热塑性弹性体管路更优异，因此在欧洲发展很快。

4）非金属的内燃机散热器及中冷器水室。在国外，散热器水室基本采用玻璃纤维增强聚酰胺材料注塑成型，技术上已经解决了密封问题。采用聚酰胺材料代替铸铝件，可以降重 30% 左右，而且可以降低成本。

中冷器热端连接涡轮增压一侧，需承受高温高压，使用温度 160 ～ 250℃，需采用特种聚酰胺材料才能满足使用要求。国外一般采用半芳香族尼龙，如 PPA 等制造中冷器热端水室。冷端虽然也承受一定温度和压力，但采用玻璃纤维增强聚酰胺 6 或 66 就可以解决。

用于散热器和中冷器水室的聚酰胺材料必须具备良好的耐冷却液性能，国外各大聚酰胺生产企业都有相应的品牌能够满足使用要求。

以上列举了内燃机非金属材料几个新兴产业发展状况。内燃机采用的非金属材料最多的就是聚酰胺，生产塑料风扇、塑料齿轮、塑料燃油管路等，技术已经比较成熟，目前处于稳定发展阶段。其他如 PPS、PEEK、PTFE 等特种工程塑料在发动机上也有应用，但由于成本比较高，加工工艺复杂，对设备要求高，应用比较少。如 PPS 应用于水泵叶轮、泵壳体，PEEK 应用于高性能涡轮、密封圈等，PTFE 应用于导向环和曲轴油封等。

发动机中也有橡胶材料，一般用于密封、管路、传动带和减振件。国外橡胶材料的技术发展也比较快，发展方向为高性能、无毒害和环保等。如曲轴后油封用的氟橡胶材料相对十年前强度更高、耐磨性好、耐高 / 低温性能更好，使用寿命提高 50% 以上。汽车燃油管向低渗透、多层结构发展，渗透率降低为十年前的 10%。发动机密封垫片也发展出很多新技术，如钢板上涂覆氟橡胶制造的缸盖密封垫，密封效果良好，是近几年研发出的新产品。

复合材料在内燃机上的应用是近几年发展起来的新趋势。复合材料能够达到内燃机大部分零件需求的高强度，尤其是碳纤维增强的复合材料，可以取代金属材料制造内燃机零部件，随着成本降低、加工技术不断成熟，复合材料在内燃机上应用范围会越来越广。

总之，随非金属材料技术的不断发展，汽车和机车等轻量化的发展趋势，内燃机上应用非金属材料会越来越多，逐渐成为内燃机材料发展一个必然趋势。

（2）内燃机先进密封材料

1）动密封材料现状和发展。内燃机行业的密封涉及润滑油、燃油、冷却液以及气路，涉及关键材料和工艺集成的内容，也涉及密封元件的结构设计科学；传统的内燃机普遍存在跑冒滴漏问题，现代的内燃机不允许存在此问题，这就必须依靠先进的密封技术。

（a）汽车密封技术现状

a）新材料和新工艺的应用。新材料和新工艺的应用推动了橡塑密封技术的快速发展，不仅使橡胶材料拥有了良好的低摩擦性能，而且还使橡胶材料具有高强度等力学性能指标。如，20 世纪 70 年代美国杜邦公司开发了氟弹性体 Kalrez（称为全氟醚橡胶），日本大金公司和前苏联也开发出此类产品。该橡胶具有聚四氟乙烯的耐热、耐化学稳定，能耐氟溶剂以外的一切溶剂，由全氟醚橡胶加工的密封制品可以在 260 ～ 290℃下长期使用，间断使用温度可达到 315℃，是目前耐热性能最好的氟橡胶。特种工程弹性体（ACM、ECO、FKM、HNBR 等）在特殊工况下取代 NBR 等低性能耐油橡胶；对橡胶表面进行低摩擦化改性处理，如喷涂 PrI′ FE 氟塑料涂层或采用 FEP（氟化丙烯）和 PFA（全氟化合物）等氟塑料包覆橡胶来制造低摩擦、高耐磨橡胶，提高产品耐介质性能（溶剂、强酸、强碱）以及抗压和耐温等级；橡塑材料的极限化改性和纳米技术改性，可提升橡塑材料力学性能和赋予一些特殊功能。由杜邦公司研发生产的高性能全氟橡胶 FFKM 具有耐高温、耐燃气和强烈的化学腐蚀，弹性好，压缩永久变形低，弹性好等优点，在化工、食品、印刷、半导体等行业应用。

b)密封系统的新结构。内燃机密封技术的发展不仅仅是新材料和工艺的进步，它同密封系统的科学设计以及新结构密不可分。

c）新型油封。该油封由 Simrit 公司独家推出，配备有测试密封（旋转密封）泄漏量的传感器，可用于设备泄漏的在线状态检测；

d）聚四氟乙烯密封件结构创新。PTFE 密封件衍生出许多新结构，应用于往复密封、旋转密封和静密封，如国内安徽中鼎集团开发出的新型 PTFE 复合油封取代汽车发动机曲轴橡胶油封。化学稳定性：几乎具备所有的化学抗性；热稳定性：可以长期在 -120 ～ 260℃温度下应用；耐干磨损性，具有自润滑性。图 3-19 所示为新型 PTFE 油封与传统橡胶油封的结构区别。

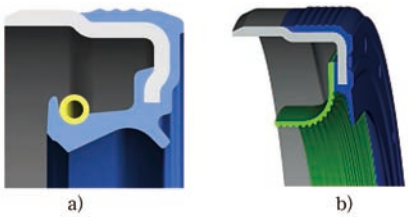


图 3-19　密封件新结构

a）传统结构橡胶油封　b）PTFE 油封

计算机模拟仿真设计的新结构。通过采用有限元分析（FEA）和 ANSYS 等商业软件，模拟应用条件下密封件的接触应力状态，通过结构参数调整消除边缘应力集中或应力峰，使整体应力分布均匀，摩擦界面上的润滑油膜更易形成且不易挤出，因此摩擦力降低，耐磨性能提高，使用寿命延长。此外，计算机模拟仿真设计还可节省大量人力、物力，大大缩短产品开发周期，提高可靠性。

e）制造工艺、设备及检测技术的进步。目前，密封件生产装备和检测技术正朝着自动化、低成本和高可靠性的方向发展。

f）高效混炼设备。全自动控制的密炼机系统结合转子改型，实现了节能高效，减少了对环境的污染，同时制造出了高品质的混炼胶料。

g）高效、先进、高品质的橡胶注射成型加工技术应用。Parker 公司生产 O 形圈，采用注射机做出飞边很小的产品，配合液氮冷冻修边、塑料粒修边及水石洗这三道工序，产品外观达到了相当高的水平。

h）先进的光学检测系统应用。Freudenberg 等公司采用 KMK 公司开发的第三代新型光学检测系统，完全取代了人工检测，成功地将密封件的质量检测完全集成到生产过程中，这种图像处理系统达到了极高的检测速度和检测精度，可检测密封件表面最微小的缺陷，如裂缝、气泡、杂质和滑移线等。

i）先进的试验装置开发应用。国内密封件企业也引进了以测量油封唇口张力为主要依据的油封检测装置，以检测气压变化测量油封唇口密封性能的气敏检测仪，具有较高的检测速率，每小时可检测 1 200 ～ 1 800 个油封。

j）密封件生产的模具设计与加工工艺改进。内燃机密封件的大批量生产制造同制备手段的进步紧密相关。

k）模具设计与生产平台提升。目前，模具设计与生产正朝信息化、数字化、无图化、精细化、自动化的方向发展，要求生产厂家既要重视设计软件的二次开发，还要具备模具型腔材料的加工流动性分析能力。

l）加工制造与工艺提升。目前我国加工制造方面已普遍采用了数控装备，专业模具制造公司已基本实现全数控化，模具精度、表观质量均达到相当高的水平，大大提高了生产效率。

m）高效率的一体化加工方式。橡塑密封模具的加工目前已经采用加工中心，这种中心集装卡、粗 / 精加工于一体，具有高功率、高速、高精度和高效率的特点，可一次加工五面。

（b）内燃机行业的其他密封新技术

a）石墨圆周密封技术。经过几十年的发展，石墨圆周密封技术已经在航空发动机轴承腔密封中成功应用。但随着先进发动机中弹性支撑和齿轮驱动涡轮风扇（GTF）发动机等新技术的广泛应用，对石墨圆周密封结构要求除了具有更高的抗氧化温度和高摩擦线速度外，又增加了承受大径向跳动和一定角向偏差的能力。而现有石墨圆周密封结构只能承受综合考虑不大于 1 mm 的径向跳动，很难满足新的设计要求。

b）刷式密封和指状密封技术。目前，篦齿密封技术在航空发动机中有着最广泛的应用。面对其较高的泄漏和性能损失，更需要积极地发展新的密封技术。而刷式密封和指状密封技术在许多方面均具有优势，但也由于存在一些相似的问题，至今仍没有在先进航空发动机（特别是军用发动机）上得到广泛应用。近年来，刷式密封技术研究主要集中在解决密封的“滞后效应”、刷丝束的“钢化效应”和“压力闭合效应”等方面，刷式密封最早应用于国外的航空发动机上，后有 GE 公司运用在工业燃气式汽轮机上，应用效果显著。20 世纪 90 年代传入国内，开始运用在燃气轮机上。现在国内火电厂不少采用了此种密封，给我国的节能降耗提供了一条安全便捷、成本低廉的途径。图 3-20 所示为刷式密封的结构图。

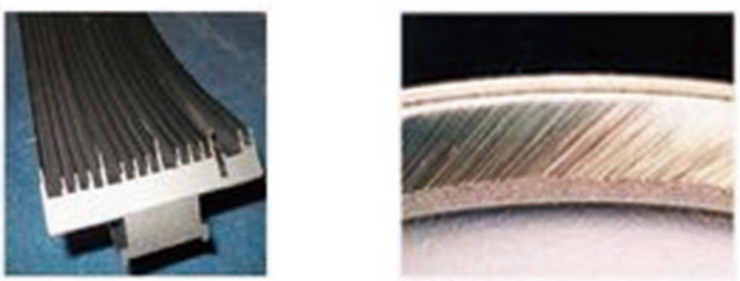


图 3-20　刷式密封的结构图

c）气膜密封技术。凭借在高摩擦线速度、高工作温度和高密封压差等工况下所具有的出色工作能力，端面气膜密封技术在转子运转较平稳的地面旋转机械

中得到广泛应用。但发动机转子系统剧烈振动和变形使密封面在工作时的位移和跳动可达到气膜厚度的几十倍，因此，尽管对端面气膜密封技术的研究与开发已进行了几十年，发展了流体静压、流体动压和动静压混合等多种形式，以及包括吸气式端面密封结构在内的多种创新结构，但由于密封结构端面的磨损过度或是泄漏过大等原因，端面气膜密封技术没有在航空发动机上实际应用。

d）磁性流体密封技术。磁性流体密封技术是一个来自美国航天局空间项目的典型派生技术。最初的开发用于在外层空间失重的条件下推动火箭燃料，这种利用磁力来控制流体的技术已经被有关工程技术人员推广应用到地面上。在过去30年中，这种简单的密封原理已应用在众多的结构中，有无数的装备依靠磁性流体密封在运行，这类装置遍及半导体和真空工业中，上述工业依靠磁性流体密封无泄漏、不磨损的特点来提供恒定的质量。计算机磁盘驱动器行业已经安装了数百万的磁性流体密封，用作驱动器电动机和精密存储装置之间的隔离密封。这种密封的优势就在于较低的安装成本和可靠的使用寿命。随着经济的发展，在许多回转动密封装置上，磁流体密封得到了广泛的应用，例如在单晶硅炉、真空钎焊炉、真空熔炼炉、化学气相沉积、离子镀膜、液晶再生等真空设备的密封，以及高温高压设备及对环境要求较高的设备的密封。理论上，该技术可以应用于内燃机，但尚无应用先例。

2）工艺黏接密封

（a）技术现状综述。动力及传动系统是汽车的核心部件，零部件或总成装配中需要密封。密封偶合件间有相对运动的密封称为动密封，如油封和水封；密封偶合件间没有相对运动的密封称为静密封。静密封主要有垫密封、密封胶密封和直接接触密封三大类。静密封广泛应用于部件或总成装配中法兰面、碗形塞、螺栓及管接头等部位的密封问题，解决装配螺栓、齿轮与轴配合的松动问题，以防止润滑油、燃油、冷却液的泄漏，从而保证汽车的正常运行。因此，系统密封性能的好坏是衡量汽车质量的一个很重要的指标，也标志着车企的技术水平。

a）垫片密封。采用预制式纸垫片、橡胶垫片或金属垫片，通过压缩形变来填充密封界面缝隙。因在实际生产过程中，由于机加工设备和加工水平的局限或加工成本考虑，密封结构以及密封垫片自身材料性能的缺陷，使其密封质量难以达到要求，因此，时有泄漏问题发生，严重影响汽车发动机的使用性能。特别是随着轻量化的发展趋势，越来越多的薄壁零件、轻金属零件及非金属零件的采用，垫片密封方式在内燃机法兰密封中越来越少采用，除了个别部位因为温度、强度

等特殊要求。

b）密封胶密封技术。密封胶密封是革命性的密封方法。密封的原理是通过化学黏接的方式实现密封，并且同时具有防止偶合部件之间的锈蚀、增强偶合件强度及耐用度、密封部位免维护、降低零件加工成本的优点。国外采用密封胶密封法兰、螺纹件、工艺孔等已有半个世纪的历史。近十几年随着轻量化零附件的实际应用、操控性要求的提高，越来普遍的的采用黏合剂密封技术， 同时成功开发和使用了一些新的密封材料的技术， 成功地解决了薄壁零件、轻金属零件及非金属零件的密封；同时降低了零件加工成形的成本。

c）内燃机装配用黏合剂。主要应用于各种平面、孔盖、管接头的密封和螺栓的锁固，可以防止油、水、气的泄漏和螺栓的松动，直接影响汽车的正常运行，主要有厌氧胶和硅酮密封胶。对于发动机而言，主要用胶点及用胶类型如表 3-6 所示：

表 3-6　主要用胶点及用胶类型

用胶点	需求胶粘剂类型	密封部位对黏合剂的要求
油底壳—缸体结合面	硅橡胶	油底壳与缸体结合面为发动机上最大的密封面，并且油底壳分为冲压件及铸造件。对于冲压件油底壳，由于其平面度及刚性较差，装配后的间隙较大，并且在发动机正常运行过程中由于振动产生的位移也会稍大。因此，该部位一般需要选择高黏度、高延伸率、耐机油良好的硅橡胶产品 。 高黏度：由于该部位装配后间隙可能稍大，并且发动机下线前一般都需要经过气密性检测，在气密性检测时，硅橡胶并未深度固化，因此此时仅能依靠黏合剂本身的黏度抵抗气体的压力，防止泄漏。因此该部位需要高黏度产品。 高延伸率：该部位在发动机运行时，振动变形会更大，据有关数据显示，完成装配后，密封胶的厚度约为 25 μm，而在发动机运行过程中，油底壳与缸体间的最大间隙可能达到 100 μm，因此此部位需要高延伸率的硅橡胶产品。 耐机油：油底壳部位长期接触高温机油，因此黏合剂产品的耐机油性能同样重要

（续）

用胶点	需求胶粘剂类型	密封部位对黏合剂的要求
油底壳／缸体—正时链罩壳／齿轮室结合面	硅橡胶	正时链罩壳／齿轮室与缸体结合部位主要接触机油，并且正时链罩壳／齿轮室一般为铸造件，整体刚性较好，因此该部位重点关注产品的耐机油性能。但部分乘用车发动机企业在此部位设计了水泵密封面，在此类型正时链罩壳密封上，需要重点关注黏合剂的耐机油及耐防冻液性能。而防冻液对硅橡胶的侵蚀更加严重。部分发动机企业在此部位选择使用两种黏合剂产品进行密封，一种耐机油性能优异，一种耐防冻液性能优异。 目前，部分黏合剂企业推出新产品，其同时具有良好的耐机油及耐防冻液性能
水泵—缸体结合面	硅橡胶	该部位需要良好的耐防冻液性能
机油泵—缸体结合面	硅橡胶	该部位需要良好的耐机油性能
上下缸体结合面	硅橡胶／厌氧胶	该部位分为两种： 与曲轴轴承座圆度无关的密封面。该密封面密封较为简单，传统用于发动机行业的硅橡胶和厌氧型平面密封胶均可。 与曲轴轴承座精度密切相关。由于密封胶装配后仍具有一定的厚度，可能会影响曲轴轴承座圆度，因此，在此部位建议使用黏度较低的厌氧型平面密封剂，装配后厌氧型平面密封剂厚度更小，对圆度影响较小
凸轮轴盖板	厌氧胶	该部位同样受精度要求影响，建议使用黏度较低的厌氧型平面密封胶
油封支架—缸体结合面	硅橡胶	该部位需要良好的耐机油性能
螺栓防松防漏	厌氧胶	发动机上，某些关键部位的螺栓、传感器需要使用厌氧型螺纹锁固胶进行防松密封。由于后期可能需要拆卸，一般中高强度厌氧胶即可。 受产量及生产节拍影响，越来越多发动机制造企业开始使用预涂型厌氧胶产品。该类型产品直接由供应商预先涂覆在螺栓或传感器上，发动机装配时直接装配即可，省去涂胶步骤，节约工时
碗形塞密封	厌氧胶	碗形塞普遍存在于缸体上，密封介质为机油、燃油、冷却液等，因此，碗形塞密封胶需要对各种介质具有良好耐受性
排气管／涡轮增压器螺栓	高温抗咬合剂	为避免排气管、增压器螺栓在发动机运行时，受到高温作用，螺栓与缸体发生烧结现象，在装配前，需要涂覆专门的抗咬合剂，避免高温下烧结现象发生

从上表可以看出，用于发动机的黏合剂产品主要为硅橡胶和厌氧胶，并且硅橡胶主要用于平面密封部位，需求量更大一些。

（b）存在的工艺密封问题与改进措施。对于平面密封产品，由于传统垫片无法从根本上解决密封问题，经常会造成泄漏，因此，目前市场上绝大多数内燃机均采用密封胶进行结合面密封。传统密封垫缺陷主要有：

a）无法 100% 填充密封面间隙。传统垫片起到密封作用主要依靠密封面给予垫片一定的压应力，垫片本身产生弹性形变，填充密封面间的围观间隙，从而起到密封作用。但由于垫片本身为固体，因此无论密封面给予的压力有多大，垫片也无法 100% 填充密封面间围观间隙。这些微小的间隙可能在后期产生泄漏。

b）长期压缩易产生塑性形变。传统垫片用于发动机密封，长期使用后，垫片一直承受密封面给予的压应力，可能会失去本身弹性，进而可能造成泄漏。

（c）先进密封材料以及技术发展方向。但是传统垫片仍具有密封胶不具备的优势：装配方便，无须专用设备、对密封面表面清洁度要求不高。对于密封胶产品，未来的技术要求和发展方向如下：

a）100% 填充。密封胶产品是液体或膏状物质，被涂覆于密封面表面，并完成装配后，密封胶可以很好地填充密封面之间的围观间隙，达到 100% 填充效果。

b）可靠黏接。密封胶产品本身都具有一定黏接性，对于常见的金属都有良好的黏接力。密封胶填充密封面间隙后，逐步固化成弹性或刚性胶层，从内部将密封面黏接为一体，从而起到密封作用。同时，密封胶还具有良好的耐热、耐机油、耐疲劳振动等特性，从而保障密封稳定可靠。

c）厌氧胶。厌氧胶是一种单组分无溶剂的黏合剂，当有氧气存在时，处于液态；一旦隔绝氧气，在表面金属元素的催化下，能迅速固化，形成牢固的黏接界面。厌氧胶具有使用方便、室温固化、耐热、耐溶剂、耐酸、耐碱性能较好、无溶剂挥发等特点，因此，广泛应用于密封、紧固、防松等工艺过程。在内燃机中，厌氧胶广泛应用于螺栓防松防漏、传感器密封、平面密封等环节。

d）硅酮密封胶。硅橡胶接触空气后，吸收空气中水分子固化。固化后胶层弹性好、耐油、耐老化、耐腐蚀、操作简单、可剥离性强、拆卸方便。高分子液态密封胶可配合垫片使用，半干型黏弹性硅酮胶可取代垫片单独使用。

e）更优异的耐介质性能。随着时代发展，信息流通速度不断加快，私家车数量越来越多。消费者对于汽车品质的要求越来越高。对于汽车的“心脏”——

发动机，消费者已经不能容忍出现漏油、漏水现象。因此，为保障在发动机整个寿命周期内的可靠密封，各个企业都在研发耐介质性能越来越好的密封胶产品。例如汉高主推的聚丙烯酸产品、天山主推的耐介质硅胶产品。图 3-21 所示为新产品和常规产品耐机油特性的对比。

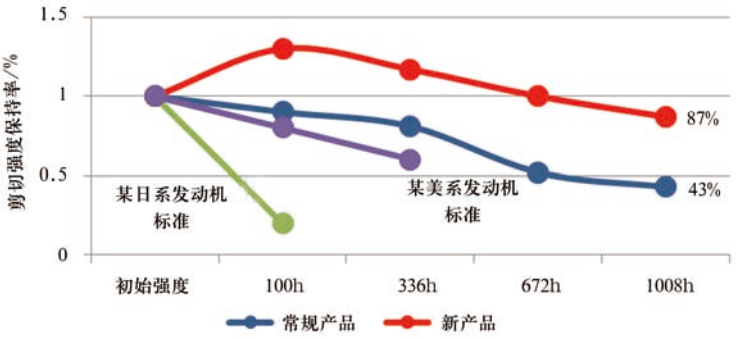


图 3-21　在 150℃条件下耐机油的特性对比

f）更快的固化速度。随着汽车产量的不断增大，为缩短装配时间，部分客户对黏合剂产品固化速度提出更高的要求，已经有部分客户在其水泵、油封支架上开始使用新一代产品。该类型产品可以通过加热、紫外光照射等方式，在几分钟之内完全固化。水泵供应商在其水泵出厂前，就涂覆该类型产品，然后通过加热等方式使其固化。在发动机工厂直接组装，免去涂胶工艺，进一步加快了生产节拍。

g）开发生产更贴近生产工艺需求的产品。柴油机、汽油机、不同类型的发动机装配过程有着明显的差异，并且发动机工厂所在地的差异也会对密封胶有不同的需求。对于发动机常用的硅橡胶而言，其吸收空气中水分子固化，在冬季、夏季、南方、北方，由于环境的变化，硅橡胶的固化时间有着极为明显的差异。如图 3-22 所示，不同产品，在不同环境下晾置一定时间后再进行黏接，其黏接性能差异明显。

未来，更加适应发动机装配的硅橡胶应该具有如下特点：在不同环境下施工不影响最终密封效果、具有更快的固化速度、在机油中能够继续固化等。

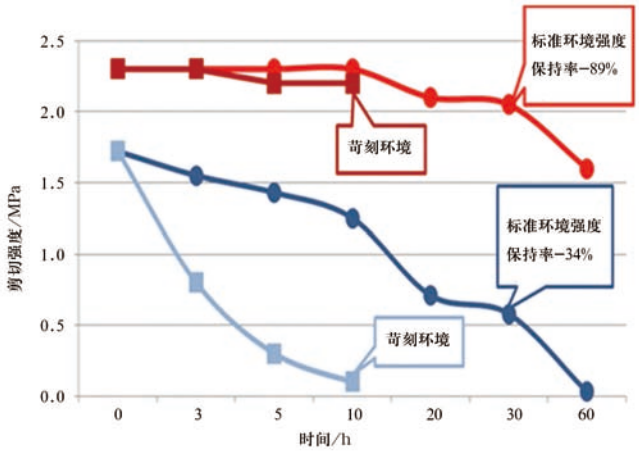


图 3-22　不同环境晾置不同时间的强度对比

（3）低摩擦技术　发动机摩擦损失占汽车燃料消耗能源的 15% 左右，降低发动机摩擦损失可以明显改善汽车动力性及经济性，是提高汽车能量效率的有效途径。依据国际内燃机协会（FVV）的研究显示，汽车发动机的摩擦损失未来可以降低 30%，因此，进行发动机摩擦学研究及开发低摩擦发动机已经成为当今社会及汽车企业的迫切需求。世界各大汽车企业及研究机构都在进行发动机低摩擦技术的研究及开发工作，发动机摩擦损失随着新技术的发展正在逐年降低。图 3-23 为丰田公司汽车发动机节能环保技术路线，丰田公司将低摩擦技术做为新系列发动机的重点研究内容。Nissan 公司新开发下一代发动机摩擦损失目标比现生产发动机低 30%，如图 3-24 所示。

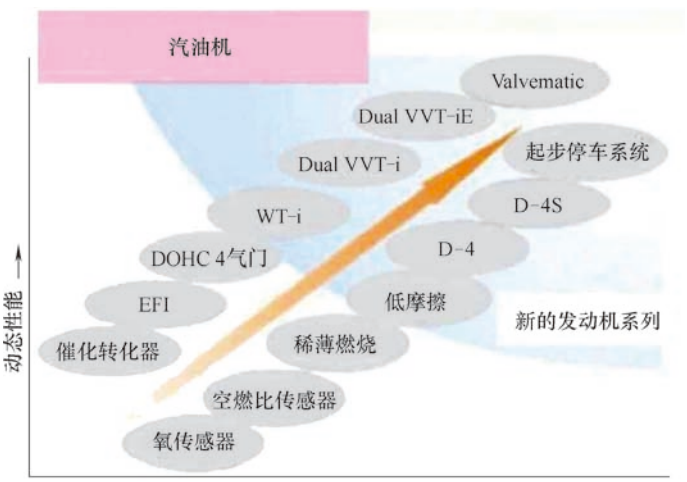


图 3-23　丰田节能环保路线

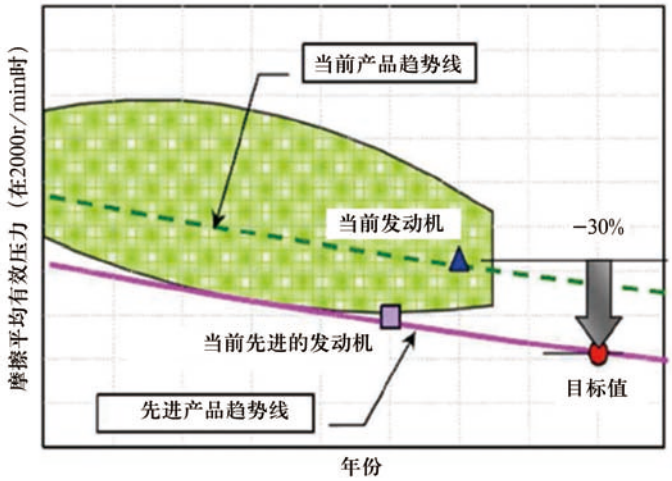


图 3-24　尼桑低摩擦技术目标

1）滚动轴承技术和应用。目前，发动机轴承大多为滑动轴承，为降低摩擦损失，研究人员尝试在发动机中应用滚动轴承。如果用滚动轴承代替滑动轴承，则可以获得极大的降低摩擦的潜力。测量技术已证实，在 90℃机油温度下，这种降低摩擦的潜力可达 55%，而且在机油温度低的情况下，由于采用滚动轴承而获得的改善则更明显，例如 35℃时达到 72%，60℃时仍超过 60%。同时，在所考察的情况下，由于采用滚动轴承，机油的体积流量降低了 40% 以上，同样对降低摩擦作出了贡献。德国 FEV 发动机有限公司将这种技术应用到汽车上，在行驶循环中的实际节油达到了 5% 以上。值得指出的是，该试验平台已成为开发低摩擦发动机的基础。Artur 等在发动机凸轮轴上应用滚动轴承，平均可减少配气机构摩擦损失 20%，如图 3-25 所示。 奔驰、宝马、奥迪等公司已在发动机平衡轴上应用滚动轴承。

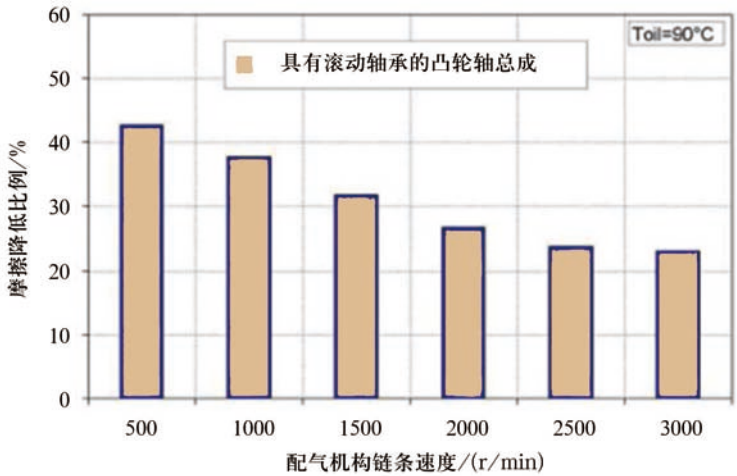


图 3-25　凸轮轴滚动轴承降摩擦比例

2）先进的摩擦副表面处理技术。采用新型先进表面处理技术成为近年来的一种趋势，可实现小投入而大幅度地提高零部件服役性能的目的。优质、高效的表面改性与涂层技术范围广阔：如热化学表面技术、物理气相沉积技术、化学气相沉积技术、物理化学综合气相沉积技术及多元多层复合涂层技术等。表面处理技术最大的优势在于能以极少的材料和能源消耗制备出基体材料难以甚至无法获得的性能优异的表面层，从而获得最大的经济效益。因此，通过先进表面处理技术可以有效降低发动机摩擦损失。

（a）激光珩磨技术。德国格林公司最先开发了激光珩磨技术，利用激光在发动机缸筒表面进行微造型加工，形成不同的微坑以利于活塞组－缸筒系统动压润滑油膜的建立，表面形貌如图 3-26 所示。采用该工艺后，缸筒表面摩擦因数大幅降低，耐磨性能大幅提高。除了缸筒表面，激光微观造型技术也被应用在活塞、活塞环及轴承等表面的加工。

（b）固体润滑技术。固体润滑是汽车发动机在边界润滑条件下，减少摩擦损失、提高耐磨性的主要技术手段。如在活塞裙部增加石墨涂层、活塞环外圆面增加铬镀层、轴瓦表面增加合金镀层等，都可以有效地解决摩擦磨损问题。随着先进固体润滑技术及加工工艺的发展，越来越多的发动机零件表面增加先进涂层以降低发动机的摩擦磨损。

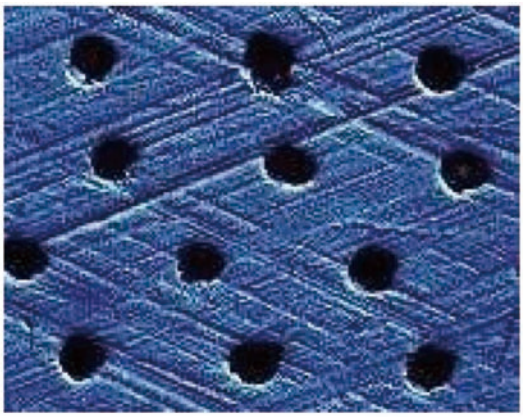


图 3-26　激光珩磨表面

a）关键摩擦副的表面减磨技术。活塞环—缸套（或缸体）配副是发动机中非常重要的一对摩擦副，其摩擦损伤约占总摩擦损失的 24%。近年来，如辉门、马勒等公司通过表面镀层技术的应用，极大地降低了活塞环组的摩擦功并提高了配副的耐久性和可靠性。图 3-27 为不同表面处理技术的活塞环耐磨性比对结果。

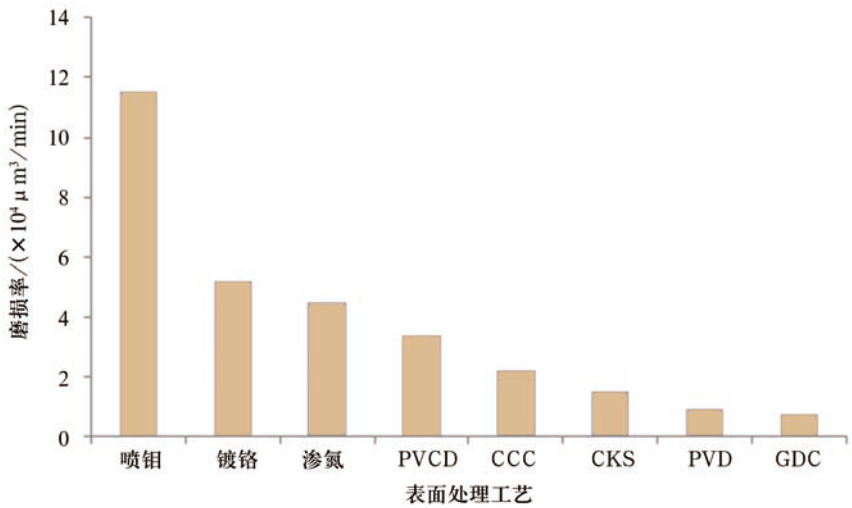


图 3-27　不同表面工艺活塞环的耐磨性

DLC 薄膜技术的应用，类金刚石碳（Diamond-Like Carbon， DLC）膜是一类非晶碳膜，是具有高硬度、低摩擦因数、高耐磨性及高化学稳定性的新型薄膜材料。

b）典型车企的应用。2007 年，日本 Nissan 公司（日产汽车和其合作伙伴 Riken、Hitachi 和 Nippon ITF 四家公司共同完成了无氢 DLC 的开发和在气门挺杆上的应用，提高了燃料的使用效率）首次开发出了充分利用纳米技术的超低摩擦技术并且把该项技术应用于日产发动机当中，通过采用无氢 DLC 薄膜，提高了与润滑油的结合性，同时通过对机油添加剂的改良，形成坚固的超低摩擦皮膜，大幅度减少了发动机零部件之间产生的摩擦力。发动机摩擦运动部件表面应用 DLC 薄膜后，降低发动机摩擦因数 40%，节约 2% 的燃油。随后，北美、欧洲及亚洲的新加坡、韩国等国家相继报道了 DLC 技术在这方面的应用。美国福特公司在发动机挺杆表面采用高硬度、高耐磨性、低摩擦因数，同时具有自润滑特性的 DLC 薄膜，实现降低燃油消耗 1%；美国辉门公司将 DLC 薄膜应用于 Al 活塞表面，直接与 Al 缸体配副，有意取消气缸套；法国雪铁龙公司将 DLC 薄膜镀在 EC8 发动机气门挺杆上面，使凸轮轴跟挺杆之间的摩擦力急剧减小，并且由于凸轮轴硬度远小于 DLC 薄膜，所以 DLC 薄膜基本不会被磨损，反而会使凸轮轴越磨合表面越光滑，机械效率就越高，内阻减小、噪声降低、效率提升。

图 3-28 为冷起动试验后渗氮环与 DLC 环的耐磨性比对。图 3-29 为台架试验后含 DLC 膜与不含 DLC 膜的缸套磨损形貌。

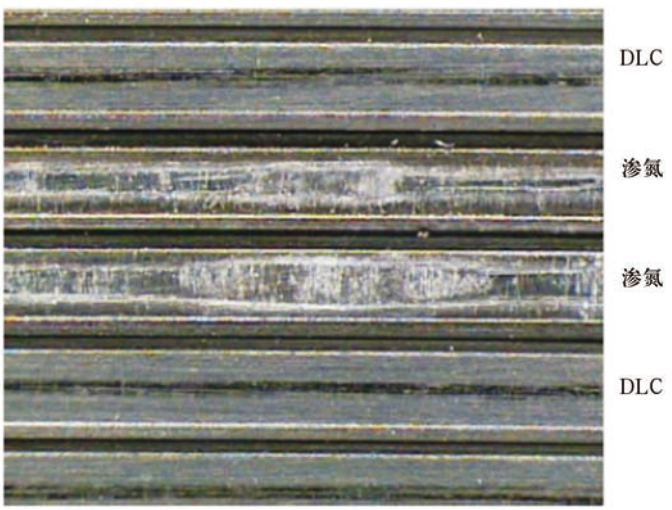


图 3-28　DLC 环与渗氮环（冷起动试验）

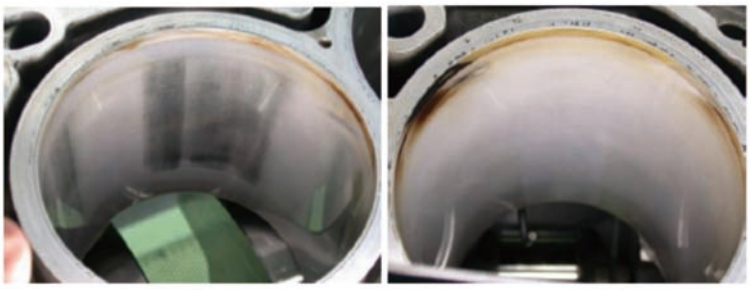


图 3-29　缸套磨损形貌

a）不采用 DLC　b）采用 DLC

辉门公司于 2014 年成功研发出最新一代柴油机活塞环，采用先进的 Ta-C 技术（见图 3-30），其抗摩擦磨损特性优于 DLC 活塞环。

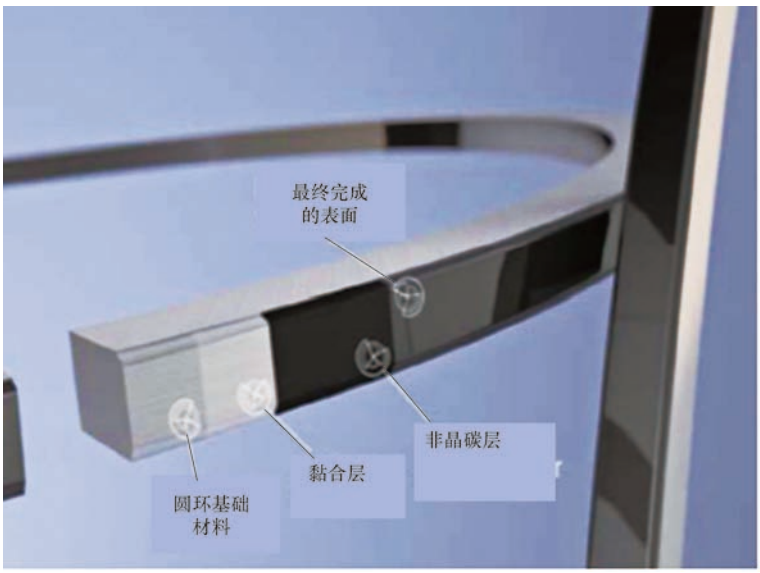


图 3-30　辉门 Ta-C 技术活塞环镀层结构原理

c）奔驰公司的 NANOSLIDE 纳米级缸壁镀膜技术。全铝发动机是实现轻量化的主要途径，全铝发动机的核心是无缸套的铝过共晶缸体，如何在铝基材的表面涂覆固体润滑膜使之具有合金铸铁缸套那样的使用寿命是技术关键。奔驰公司的这一技术是通过高压电弧将铁或者碳这类的涂层材质瞬间融化，然后在高压气流的推动下，均匀喷向轻量化的铝合金气缸内壁。这样就在气缸内壁表面形成了一层镜面般平整光亮的纳米晶体涂层（如图 3-31 所示），涂层表面光滑且密

布细微的小孔，这样的结构对于减小活塞与缸壁之间的摩擦是再完美不过的。同样的，超薄的涂层代替了厚重的钢制缸套，不仅大幅度降低了发动机的整体质量，而且减小摩擦也意味着更低的燃油消耗以及更低的尾气排放。例如，奔驰的AMG 的 6.3L V8 发动机从 2006 年开始就受惠于这一技术。

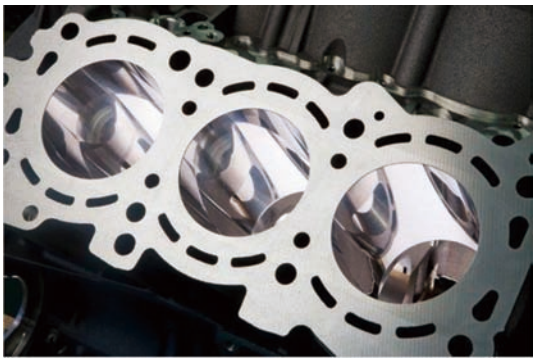


图 3-31　奔驰 AMG 铝发动机的缸套上润滑涂层

d）固体润滑膜的制备。碳基固体润滑薄膜的制备方法主要有物理气相沉积（PVD）和化学气相沉积（CVD），且可以通过金属和非金属掺杂来调控其性能（元素周期表中的大部分元素可以用来修饰碳薄膜），还可以构筑多层结构，制备工艺与生产设备的关联性非常强，因此碳基固体润滑薄膜种类众多。目前，商业化的主要是四面体碳薄膜（日产）、Si 掺杂碳薄膜（雪铁龙）、W 掺杂碳薄膜（奔驰）、H 掺杂碳薄膜（大众）和 CBC（TiCN+ 梯度碳薄膜，宝马）等，这些公司都申请了相应的专利来保护其技术。正是由于碳基固体润滑薄膜的多样性，同时这些拥有不同技术的公司都认为自己的技术优于同行，因此，国内外对碳基固体润滑薄膜尚缺乏行业标准。

5. 内燃机产品开发和产业活动更加国际化

随着法规的日益严格，在未来几年，不同先进国家的汽车排放法规将非常接近，油耗限值也将非常接近。发展中国家的排放和油耗标准在极力追赶先进国家的标准，而且各国排放测试循环也将逐渐采用更加接近于实际道路运行的世界统一循环，在这种情况下，内燃机产品开发和产业活动将表现出更加国际化的发展趋势。

目前在世界各国的排放标准和油耗还有明显的差别情况下，开发的同一款机型如果想满足世界不同市场的需要（例如美国、欧盟、日本、中国等），就必须按照各国排放标准和油耗标准的要求，对该机型的燃烧系统、后处理系统、喷油

系统、进排气系统、增压系统等重新进行技术改进，包括零部件选配、性能标定、排放认证等，开发工作量很大，成本很高。在未来几年，由于排放标准和油耗标准比较接近，同一款机型只需要少许改进，就可以满足具有同一排放水平的不同国家的市场需要，发动机产品开发成本将大大降低，产品面向的市场区域将大大拓宽。

同时，由于各国排放法规和油耗法规变得非常严格，因此内燃机技术将更加先进；另一方面，由于各国的排放法规和油耗法规非常接近，因此内燃机产品技术非常趋同化。例如，欧Ⅵ第 2 阶段排放以后，车用柴油机的喷油压力基本上为 240MPa 左右，涡轮增压压缩比基本上为 4.0 左右，排放控制系统均采用 EGR、SCR 和 DPF，控制策略非常相近。在未来内燃机产品技术的先进性和趋同性影响下，内燃机产业活动将更加国际化。主要表现为：关键零部件技术越来越高，关键技术越来越集中到少数有研发实力的零部件厂商手中，加剧了零部件商之间的竞争和兼并；主机厂越来越在世界范围寻找品质高成本低的零部件供应；主机厂则在发动机设计、系统集成、性能标定、试验测试上进行管理和技术改进，降低开发成本，满足市场竞争需求。此外，由于技术趋同，用户对产品的选择更加注重技术以外的因素，增加了市场的不确定性。总之，由于技术先进性和趋同性的影响，未来的内燃机市场竞争将更加激烈、更加国际化。

6. 发展中国家的内燃机工业更加需要政府的大力支持

发展中国家（如中国、巴西、印度等）的排放法规和油耗法规紧随发达国家的标准，因此在内燃机产品技术上基本沿着发达国家的脚印向前走，虽然能够运用发达国家的技术经验，避免发达国家曾经走过的技术弯路，更快地推进内燃机产品技术进步和产业发展，追赶先进国家的技术和产业。但是也应该清醒地看到，内燃机先进技术和核心技术（包括设计技术和零部件技术等）越来越集中在先进国家的大型跨国集团手中，发展中国家每一次排放升级或油耗升级，无不越来越依赖于发达国家提供核心技术。如果没有发展中国家政府的强力支持，内燃机工业受制于人的局面将越来越严重。更进一步讲，先进国家在开发更高排放和油耗水平的内燃机产品的同时，能够非常迅速地把业已成熟、满足较低排放和油耗水平的技术和产品，通过进出口、独资和合资生产等方式投放在发展中国家，对发展中国家的内燃机工业发展造成了激烈的市场竞争和冲击。因此，发展中国家应该制定更加强有力的政策，支持和保护本国的内燃机工业的发展。

3.4 跨国集团公司在我国投资发展概况

从我国内燃机主机市场看，包含柴油机和汽油机在内的内燃机主机生产厂商共有 300 家左右，广泛用作汽车、摩托车、工程建筑机械、农业机械、船舶、铁道内燃机车、内燃发电设备、军用装备、地质和石油钻机以及旅游运动器械、园林机械和各种通用机械的主导配套动力，在我国交通运输、基础建设、农业现代化、国防现代化以及推动和促进经济发展、提高城乡居民生活水平等方面发挥着重要作用。我国内燃机行业上规模企业 50 家，在上规模企业中外商独资和中外合资企业共 15 家。目前，国内发动机产品中 40% 以上为中外合资企业产品，汽车发动机以汽油发动机为主，2012 年约占 81%。乘用车以“三大三小”为特点，分别与德国大众和奥迪、日本铃木和丰田以及日产、美国通用和福特、意大利菲亚特开展合作。

改革开放以来，跨国内燃机集团公司进入中国，开始了和国内发动机公司合作模式。国内企业通过学习先进技术，提升自身产品、技术、管理和制造水平，通过合资合作方式快速扩大市场的占有率和影响力，推动国内自主创新能力的提升。通过先进整机技术的引进和合资，同时带动一批内燃机零部件企业技术、研发工艺和试验技术、先进管理技术的提升。

3.4.1 跨国内燃机集团公司在我国投资发动机情况

跨国内燃机集团公司在中国投资模式分为与国内企业股比 50 ： 50 的合资、国内企业控股和跨国内燃机集团公司独资的模式。

1. 柴油机

跨国内燃机集团公司在中国投资生产的柴油机产品主要用于轻、中、重型载货汽车、中高级城际客车、大中型公交客车、工程机械、矿山机械、石油机械、轨道交通设备、港口机械、船舶推进动力机组和辅助动力机组、发电机组等。主要采用合资建厂和独资的投资形式，合资和独资建厂分别见表 3-7 和表 3-8。表中可见发动机排量包括 4 ～ 50L，功率最大达 1 343kW。柴油机技术采用共轨电控燃油系统、SCR 和 EGR 燃油喷射系统，满足国Ⅲ、国Ⅳ及以上的排放控制要求。

表 3-7 柴油机合资情况

合资公司名称	机型	功率覆盖范围/kW	用途	股比	年产能力/万台
东风康明斯	4～13L系列中重型柴油机和天然气发动机	58.8～499.8	轻、中、重型载货汽车、中高级城际客车、大中型公交客车、工程机械、船用主辅机、发电机组等	50∶50	23.5
重庆康明斯	11～50L系列重型柴油机	145～1 343	重型汽车、大型客车、工程、矿山、石油、轨道、港口机械、柴油发电机组、船舶推进动力机组和辅助动力机组、泵类动力机组以及其他动力机组	50∶50	1.5
西安康明斯	11L系列重型柴油机	226～323	卡车、特种车、客车和各种工程机械领域		5
北京福田康明斯	2.8L和3.8L轻型柴油机	78.6～123	轻型(中型)载货汽车、VAN、轻型客车、皮卡、MPV多功能车、SUV等轻型车辆以及小型工程机械和小型发电机组等	50∶50	40
一汽道依茨(大连)	轻中重3大系列	62.4～249.9	轻、中、重型载货汽车、轻型客车和工程机械等		
潍坊潍柴道依茨柴油机有限公司	DEUTZ(道依茨)226B系列柴油机		工程机械、混凝土拖泵、汽车、发电、船舶等领域		2.5
江淮纳威司达柴油发动机有限公司	2.8L、3.2L、4.8L和7.2L		轻、中和重系列	50∶50	25
上汽菲亚特红岩动力总成有限公司	2.3～12.9L	71～353	重、中、轻型商用车及工程机械、船舶、发电机组的动力		
上海菱重发动机有限公司		500～1 600	工业用	50∶50	

表 3-8　跨国企业独资公司

独资公司名称	机型	用途
广西康明斯工业动力有限公司	QSB7 系列和 L9.3/QSL9.3 系列中马力柴油发动机	工程机械专属动力
无锡铂金斯动力系统有限公司	1100 系列中型柴油发动机	农业机械和工程机械

2. 汽油机

合资企业生产的汽油机主要用于乘用车。生产发动机的汽车合资企业，其发动机产品大部分保留原国外跨国公司的产品配套体系。乘用车汽油机共计 1 710.55 万台，其中合资品牌占较大部分。汽油机采用增压直喷、进气系统 VVT 和部分 VVL 系统，采用电控燃油系统和三元催化器排放控制系统，满足国Ⅲ、国Ⅳ及以上的排放控制要求。

3. 内燃机零部件

自加入 WTO 以来，我国汽车零部件市场进一步对外开放，世界汽车内燃机零部件跨国企业加快了到中国合资或独资设厂的进程，以参与和分享国内高速增长的内燃机市场以及利用廉价的生产成本，这在加剧国内发动机零部件市场竞争的同时也带动和促进了我国发动机零部件工业的发展。

（1）燃油电控系统　电控系统是发动机的关键零部件。国内已有超过 10 家柴油机燃油系统企业在开发燃油供给系统，已取得阶段性成果，但在共轨系统的关键技术稳定性、一致性、可靠性和成本方面与 BOSCH、DENSO 等外资公司尚有一定的差距。汽油机电控系统也主要由 BOSCH 、德尔福和大陆等外资公司提供。

（2）增压器　随着对内燃机节能减排要求的提高，更多的内燃机采用增压技术。利用内燃机的废气能量，增加内燃机的进气量促进发动机燃烧，降低油耗提高效率，有助于发动机排放控制，有利于发动机的轻量化设计。2013 年中国市场约生产 1 000 万台增压器，独资和合资企业的产品占国内产品的 40%。

（3）排气后处理系统　三元催化器在汽油机中发挥着控制排放的作用。三元催化剂市场主要由跨国公司企业占有，其中主要为庄信、巴斯夫、优美科和日企的 4 家企业。外资公司以其丰富的研发经验、先进技术、雄厚实力，随主机厂配套进入中国市场，完成规范的试验考核和完善的配套体系。2013 年我国乘用车销量约为 1 800 万辆，其三元催化剂的月需求量 2 500 万 L，其中 80% 以上（月 2 000 万 L）是由外资公司提供的。合资品牌的乘用车（约 1 080 万辆）所用的催化剂均为外资公司生产的产品。而 720 万辆自主品牌乘用车中 45% 的催化剂也

为外资公司的产品。

还原催化（SCR）系统是降低 NO_X 的关键技术。我国从 2013 年开始实施国Ⅳ排放标准，有 9.4% 的重型商用车配备该系统，销售总收入约达 15 亿元，外资企业天耐克、北京康明斯等公司的销售收入约为 3 亿～ 4 亿元，占国内销售收入的 20% ～ 30%。

轻型货车在燃油系统使用共轨的前提下采用废气再循环（EGR）系统＋氧化催化转化器（DOC）＋颗粒催化氧化器（POC）的技术路线，这也将是今后轻型车满足国Ⅵ排放标准的主流技术路线。国内生产氧化催化转化器（DOC）＋颗粒催化氧化器（POC）的外资公司企业巴斯夫、优美科和依科卡特 3 家产量约为 100 万 L，占国内 1/3 的市场份额。

国内生产 EGR 的外资公司是昆山皮尔博格和宁波博格华纳。2013 年产量分别为 6.5 万辆和 9.5 万辆，占国内生产量的 33%。

（4）换热系统　热管理技术是提高内燃机热效率的关键技术。增压中冷器和 EGR 冷却器等换热器是发挥增压系统和 EGR 系统作用的关键零部件。换热器行业全球著名外资公司如福特、贝尔、日本东洋和摩丁等均以独资、合资或控股的方式加快进入中国市场。目前，三资企业和外商独资企业已达 30 余家，销售额已占换热器行业的半壁江山。

在汽油机方面，外资公司如电装和三国的可变气门进气系统（VVT）、马勒和辉门的活塞等均占有相当的市场份额。

3.4.2　外资内燃机集团公司在我国投资特点

随着内燃机行业的不断发展，外资公司合资合作将在控股权、合作的层面及合作的深度等方面寻求新的突破。随着国内内燃机企业实力的不断增强与壮大，内燃机合资将向多元化、全产业链及共赢方向发展。

1. 合作层面更深入

外资公司在国内建立独资和合资公司的技术中心。外资内燃机集团公司随着国内的业务范围的扩大和整个全球资源的统一配置，为了就近形成技术研发能力，纷纷在国内建立独资的技术中心。如重庆康明斯发动机有限公司大马力发动机技术研发中心和武汉康明斯东亚发动机研发中心。

外资内燃机集团公司为适应新时代的发展，由引进技术国产化研发制造生产，转变为合资自主开发的新模式。国内建立的合资公司的初期主要是引入外资企业的产品、品牌、技术、标准、资金、工艺和管理经验等，中方企业提供生产工人、

土地、厂房、流动资金等，合作层面较浅且受制于外方，技术人员满足于外资产品的国产化。随着合资合作的深入，外资公司内燃机合资企业更注重建立融合本地需求的适应性开发工作，结合中国国情，政策法规、道路条件，油品等，达到外资发动机品牌中国化。随着国内内燃机行业的发展和国内企业实力的增强，合资企业有必要由单纯在中国制造转向研发与制造并重发展，建立起自主研发能力，以减少对外方技术的依赖程度，开展在新产品的适应性开发、新技术应用、新工艺改进、合资自主品牌等方面的工作。现在的合资合作朝着建立在双方优化资源条件和良性竞争关系下，是共同谋取成功基础上的深度合作，建立本土化的技术中心，并且已经或正在制定自主研发规划。

神龙汽车公司从东风与雪铁龙公司的 E6 发动机的开发开始，强调加强合资企业的本地化研发、采购、生产和销售，充分利用中国市场和其他市场的规模和增长，扩大合资公司产品市场份额。技术中心新建的发动机试验室同欧洲最新发动机产品试验技术同步，具有 70 余项自然吸气及涡轮增压直喷发动机产品开发试验开发能力。

2. 扩大合作领域，拓宽发动机应用领域

外资内燃机集团公司为扩大产品的市场占有率，建立多家合资公司，拓宽发动机应用领域。如康明斯在国内建立四家合资企业，排量覆盖包括 4 ～ 50L，功率覆盖 80 ～ 1 100kW。应用于汽车、工程机械、矿山机械、石油机械、轨道交通设备、港口机械、船舶主辅机、发电机组等领域。长安和康明斯签约生产轻型柴油发动机。江淮汽车集团与美国万国卡车公司签订发动机合资项目协定，提升企业轻型和重型发动机生产能力。

3. 建立拥有多区域的服务中心、客户支持平台和授权经销商的服务网络

2014 年 6 月 11 日康明斯国内第四家区域零件调配中心在线正式运营，可针对本土市场需求，提供整合、优化、智能的地区物流服务，让客户享受优质便捷的备件服务。

4. 合资企业同时开拓国内外两个市场

由单纯面向中国市场转向在中国市场销售的同时寻求出口。2013 年，福田康明斯发动机在巴西出口已近万台；俄罗斯、土耳其、西班牙、墨西哥、巴西、智利以及中东地区的众多国外整车厂已将福田康明斯发动机作为轻型发动机配套首选产品。

产品开发能力是内燃机工业技术的核心，加强产品开发能力的培育，创建具

有自主知识产权的品牌是实现可持续发展首要的问题和关键。建立和健全技术研发中心，逐步形成自主开发能力。我国企业在合资过程中应当注意以下几点：一是注重合资内涵，提高合资合作的平等性；二是合资企业应当在消化、吸收的基础上进行创新，以提高自身的研发能力。三是避免合资产品过多重复引进。

3.5 国外内燃机企业的管理模式

3.5.1 发达国家内燃机制造企业的基本特点

1. 生产模式多元化

欧盟、美国、日本等发达国家和地区的内燃机制造厂家多数均属于使用这些内燃机的终端设备制造企业集团。例如，大的整车企业集团内均有轿车发动机或商用发动机制造分部，如美国三大汽车公司、纳威斯达等，欧洲的大众、戴姆勒—奔驰、标致—雪铁龙、雷诺、菲亚特等、日本的丰田、本田、日产、马自达、日野、五十铃等、韩国的现代等。而非道路用途发动机也在工程机械和农业机械制造企业生产，如美国的卡特彼勒和约翰迪尔。这样的企业归属关系被认为起码带来两个优点，首先发动机的设计与开发最贴近终端设备的应用要求，再者发动机的销售能得到较好的保证。也有少数的独立发动机公司，如美国的康明斯、德国的道依茨和 MTU 等，而康明斯近些年来也在重视与整车厂家的结盟关系，尤其在中国市场。

2. 高度集中、规模化经营

发达国家和地区的内燃机制造厂家均具有相当规模。如美国通用、日本丰田和德国大众等企业的乘用车发动机年产量均接近上千万台，其他整车厂的乘用车发动机年产量一般也在百万台以上。中重型商用车发动机的生产厂家同样很集中，总共只有康明斯、纳威斯达、曼、奔驰、雷诺、斯堪尼亚、沃尔沃、五十铃、日野等十余家。规模生产的优势很多，可以在产品研发方面投入较多资金，购置最先进且效率最高的制造设备，零部件采购成本低等。

3. 完善的配套体系

发达国家和地区的内燃机制造厂家在长期的发展历程中逐步建立起完整的零部件供应商配套体系。整机厂与零部件厂商之间的关系或者是纵向一体化，即零部件厂部分或完全隶属整机厂，像在一些欧美企业中的形式；或者是以合作为基础的转包模式，即整机厂与零部件厂维持长期稳定的贸易关系，整机厂向零部件厂提供必要的支持，日本企业多采用这种形式。近些年来，当国外的整车 / 整机厂进入中国市场时，也将其配套零部件供应商伙伴带入中国市场。在此过程中，

我们看到了这些整车 / 整机厂与配套零部件供应商伙伴之间密切的合作关系。

4. 强大的研发能力

发达国家和地区的内燃机制造厂家都具有较强的产品研发能力，通过研发方面的巨大投入推出差异化的产品，从而提升了市场竞争地位。世界一流的发动机研发基地都集中在前述的整车 / 整机企业，这些厂家几乎都建有满足排放认证试验的发动机台架实验设施。美国通用汽车的研发中心无疑是全球顶尖的，它坐落在底特律东北部郊区的沃林，占地 267 万 m^2，鼎盛时期有 15 000 多名研究人员在由 38 座建筑物构成的设施中工作。发动机的研发设施，不仅有各种单缸和多缸试验机台架和各种常规性能与排放测试设备，还有进行发动机缸内过程机理的激光多普勒测速（LDA），粒子图像测速（PIV）等光学诊断仪器。在 20 世纪 80—90 年代，通用汽车发动机研发项目内容范围也很广，既有像轿车柴油机应用高压共轨燃油喷射系统的可行性项目，还有评价各种热力机，包括蒸汽机、燃气轮机、斯特林机和内燃机作为轿车动力相比较的基础性研究。 而奔驰、宝马和奥迪等企业早在 20 年前投入巨大资源研制新一代 V6/V8 型轿车柴油机，应用了高压共轨、可变几何截面增压器等一系列新技术，开发成功的产品不仅满足排放法规，转矩特性和燃油消耗保持了柴油机的优势，且功率密度和振动噪声（NVH）等指标可与汽油机相媲美。本田从 20 世纪 80 年代起潜心研究轿车发动机的多级可变气门升程（i-VTEC）技术，即同时控制气门开闭时间及升程的气门控制技术，并使得该技术第一次得到成功应用，从而使本田发动机长期享有良好燃油经济性。丰田长期致力于混合动力技术的研究，将先进的发动机技术与电力驱动技术相结合，开发的普锐斯轿车得到了全球市场的认可。

3.5.2 发达国家内燃机制造企业的组织管理

在欧美和日本等发达国家和地区，内燃机制造业是一个传统产业，多数企业具有近一个世纪的历史。几十年的发展和演变，企业的管理架构早已成熟，以下首先以通用汽车公司为例，因为该企业曾长期作为汽车行业最大的制造商，也是全球最大的内燃机制造企业之一，其管理经验和体制为美国大公司所广泛采用，更是被欧美汽车行业作为标杆。

1. 通用汽车斯隆模式

通用汽车公司管理的基本原则是：决策权与经营权相分离，分散经营与协调管理相结合，这一原则由通用汽车公司历史上一位贡献卓著的董事长斯隆于 20 世纪 20 年代提出，即著名的斯隆模式。

在斯隆模式中，决策权归属企业领导部门。通用汽车的领导部门由董事会及其所属的委员会组成，负责决定公司的政策方针。董事会是公司的最高决策机构，定期举行会议，讨论经营范围、产品方向、生产规模、投资安排、资金筹集、计划目标、重要岗位人事任免等问题。董事多为大股东和公司高级雇员。董事长与总经理统揽最高权力，做出重大决定。董事会下设若干个委员会，包括关系委员会、执行委员会、财务委员会、经营委员会、任免委员会和分汇与酬偿委员会等，其中权力较大的是执行委员会和财务委员会。执行委员会由董事长、总经理、副董事长、副总经理和重要经营部门经理组成，负责公司经营活动的全面领导，掌握除财务以外的各项决策和指挥，但不从事日常业务经营活动的具体执行。财务委员会独揽公司财务大权，决定某限额的固定资本投资，制定公司的长期财务目标，确定公司高级雇员的薪酬，审批执行委员会提出的各种产品的价格方针，筹措资金，监督和检查公司各部门的经济效果，争取最大利润。

由总公司、分公司和下属工厂三级组成的一个直线指挥班子行使经营权，指挥日常业务经营活动。总公司下设若干职能部门，分别由一名副总经理负责。分公司和下属工厂亦根据需要设立相关职能部门。总经理有权指挥各分公司的经营活动，各分公司经理有权指挥下属工厂的经营活动，形成了纵向的指挥关系。

按照分散经营的原则，各个分公司或事业部成为总公司内部完整的自治经营单位，也是利润中心。分公司经理有权做一定的固定资本投资，安排生产计划，决定零部件的采购，负责产品销售。分公司的下属工厂主要从事生产经营活动，任务包括：增加产量、提高质量、降低成本、为扩大销路和争取最高利润服务。同时也要遵守公司制度和标准，按时提交计划与报表，培养并向上输送人才。涉及采购、销售、试验设施支持等方面的工作均由分公司负责。

协调管理体现在职能部门的作用和关系委员会上。三级管理机构都设有职能部门，它们分别扮演各级领导的参谋和顾问的作用。董事会的各个委员会也有类似的作用。依靠职能部门专业人员的分析，使高层在分散经营的体制下做出正确的决策。而关系委员会也是为了协调上下级之间的矛盾而设立的，其组成是由那些与某一职能有关的部门的人员组成。比如为协调总公司和各级部门的采购活动而设立的‘总采购委员会’由总经理、各分公司总经理和采购部门经理组成。通过协调既能得到大批量采购的优惠，又能让各个经营单位保持独立采购的权利。

2. 丰田生产管理模式（TPS）

作为当今世界汽车制造业三巨头之一的丰田，同样也是全球最大的内燃机制

造企业，在二战后的几十年间获得持续发展，在北美乃至全球市场获得巨大的成功。在此过程中丰田没有全部照搬美国的汽车管理模式。因为丰田的领导者一开始就意识到了，美国汽车工业的管理模式虽然已很成熟和先进，但其生产管理环节需要改进，需要采取一种更灵活，反应速度更快，更能适应市场需求，从而能够提高产品竞争力，降低成本的生产方式。这就是丰田管理模式的由来，它归纳起来有以下几个方面：

（1）拉动式准时化生产　要求以最终用户的需求为生产起点，强调物流平衡，追求零库存，要求上一道工序加工完的零件立即进入下一道工序。生产线依靠看板传递信息，生产节拍由人工干预、控制，重在保证生产中的物流平衡（对于每一道工序来说，均要保证对后道工序供应的准时化）。由于采用拉动式生产，生产中的计划与调度实质上是由各个生产单元来完成，在形式上不采用集中计划，但操作过程中生产单元之间的协调则极为重要。

（2）全面质量管理　强调质量是生产出来而非检验出来的，由生产中的质量管理来保证产品的最终质量。在每道工序进行时均注意质量的检测与控制，保证及时发现质量问题，培养每位员工的质量意识。如果发现问题，立即停止生产，直至解决，从而保证不出现对不合格产品的失效加工。

（3）团队工作方法　每位员工在工作中不仅仅是执行上级的命令，更重要的是积极地参与，起到决策与辅助决策的作用。组织团队的原则并不完全按行政组织来划分，而主要根据业务的关系来划分。团队成员强调一专多能，工作的氛围是信任，以一种长期的监督控制为主，而避免对每一步工作的稽核，提高工作效率。团队的组织是变动的，针对不同的事物，建立不同的团队，同一个人可能属于不同的团队。

（4）并行工程（Concurrent Engineering）　在产品设计开发期间，将概念设计、结构设计、工艺设计、最终需求等结合起来，保证以最快的速度按要求的质量完成。TPS 的另一大理念—零库存，就是随时反馈订货信息，实现生产与销售的并行化。

TPS 最终目标是企业利润的最大化。管理中的具体目标是通过消灭一切生产中的浪费来实现成本的最低化。TPS 通过准时化生产、全面质量管理、并行工程等一系列方法来消除一切浪费，实现利润最大化。TPS 最具特色的方法是，在组织生产时对消灭物流浪费的无限追求，即对物流环境的需求和内部的分权决策。

丰田管理模式的成功根源于其独特的日本文化因素，丰田本身却将其独特的

管理模式带到了全世界，这其中的代表就是位于美国肯塔基州的丰田乔治城汽车生产厂，其各项经营指标均达到北美地区汽车生产厂的最高水平。但是日本丰田公司的成功经验很难在其他同类公司得到推广。

3.5.3 传统管理模式的缺陷

斯隆模式尽管经过数十年的应用，已成为一种成熟的管理模式并得到发达国家和地区大企业的普遍仿效。但随着全球经济一体化的趋势，市场竞争的加剧，传统管理模式面临巨大的挑战。经历了二战后的经济快速发展期，通用汽车逐渐形成了一种僵硬的企业文化。面临丰田等竞争对手的巨大挑战，以至于到 2009 年 6 月 1 日通用汽车宣布申请破产保护。传统管理模式带来的另一个问题是技术上容易故步自封。与日本和欧洲的企业相比，美国企业在内燃机技术创新方面缺乏应有的动力。

3.5.4 危机中的变革

进入 21 世纪各国政府在实施严格的道路和非道路发动机污染物排放法规的同时又推出温室气体的排放标准；在另一方面，新兴国家经济的崛起为汽车和内燃机制造业的发展提供了新的机遇。在这些因素的促动下，发达国家汽车和内燃机制造业经历了一系列变化，在满足各种法规的前提下，提高生产效率，降低成本，增强企业竞争力，扩大市场份额，实现利润最大化。这些变化有如下一些内容：

1. 并购或建立战略合作伙伴关系

通过并购可以达到不同企业的优势互补，扩大或完整产品线，消除竞争对手和迅速扩张的目的。在过去的 20 多年时间，兼并重组经常出现。通用汽车并购了萨博，戴姆勒并购了克莱斯勒和底特律柴油机公司，福特并购了沃尔沃、猎豹和路虎，雷诺并购了马克。

另一种企业间的合作方式是通过相互投资或持股建立同盟关系，从而在一定程度上整合资源实现共赢的结果。如雷诺购买了日产汽车 36.4% 的股份，双方建立了雷诺—日产联盟。福特购买了马自达 33% 的股份，双方展开了多方面的合作并共享若干产品平台技术。通用汽车购买了 20% 的菲亚特股份，双方在采购及发动机、变速箱等领域分别成立了两家占股相等的合资企业。

2. 关闭亏损部门

2008 年的金融危机之后美国三大汽车公司经过破产和重组，开始大刀阔斧地砍掉那些长期亏损的部门，如通用汽车关闭了奥兹姆比尔、庞提亚克、土星、悍马和萨博等部门；福特迅速地出售了捷豹、路虎和沃尔沃等部门，同时将公司

的所有产品整合在 8 个平台上。美国三大汽车公司在金融危机前后共关闭了 38 条汽车装配线。

3. 减少内部机构层次

在通用汽车破产重组的过程中，整个机构被大幅度简化，裁减冗员，实现扁平化管理。

4. 调整与零部件供应商的关系

为了降低零部件采购成本，通用汽车公司于 1999 年将其零部件分部—德尔福剥离出来。福特汽车公司也将自己的零部件分部 —— 伟世通分离出来。丰田公司对不同的零部件供应商实行不同的管理模式。对于一般性零部件，主要考虑价格、质量与交货地及时性是否满足要求。对于核心零部件，分包给与自身有紧密资本或财务联系的企业，将其视为特殊供应商并建立起战略合作伙伴关系。

5. 选拔创新人才作为企业领导者

企业的成功需要一个科学的现代化管理制度，更为重要的是有效地实施这个制度的企业领导人。高级管理人才的选拔是其中的关键。如福特公司选拔了艾伦·穆拉利作为决策人，成功地带领公司渡过了难关。

6. 控制人工成本

过高的人工成本一直是困扰欧美企业的关键问题之一，为解决此问题，采取的主要措施有：

1）改革用工机制。

2）调整与工会的关系。

3）在新兴经济体国家建厂。

第 4 章

差距和问题

我国已经形成了一个较为独立完整的内燃机及其配件生产制造及研发体系，为道路机动车、非道路及固定装置提供动力，为国民经济快速发展提供了支撑；同时形成了覆盖全国和部分国外的后市场服务体系，为国内、国外两个市场服务。从零部件、原材料到主机，形成了较为完整的产业链。我国已经成为内燃机生产制造大国。

4.1 存在的主要问题

从行业整体上看，内燃机产业大而不强，自主创新能力弱，关键核心技术与高端装备对外依存度高，以企业为主体的制造业创新体系不完善；产品档次不高，缺乏世界知名品牌；资源能源利用效率低，环境污染问题较为突出；信息化水平、产业国际化程度不高，企业全球化经营能力不足。内燃机行业的产业结构、产品结构创新设计、工艺装备水平、经营管理水平、企业的创新开发能力和人员素质等还较低，服务创新能力不足。

4.1.1 规模优势不突出

内燃机工业整体规模优势不突出、产量很大但效益不高，制造体系水平参差不齐，总体水平不高。集中度不高，我国有 3 000 多家整机和零部件生产企业，乘用车前 10 位的市场集中度为 55.4%，产量不及丰田公司或通用公司一家，规模效益不明显，导致研发投入强度低和人员分散，创新能力不足。

4.1.2 设计研发能力差距明显

改革开放以来，我国内燃机行业取得了长足的进步，但产品开发能力与国外先进技术水平相比仍有明显差距。主要体现在产品设计研发信心经验和动力不足，缺乏知识支持和数据积累及设计工具、软件支持，没有完整的产品开发数据库，产品的开发和生产工艺等相关标准不够健全，难以形成高效的产品创新设计的能力。

4.1.3 核心零部件缺失

目前能够满足高性能内燃机要求的核心零部件严重缺失，如汽油机的缸内直喷系统、耐高温的增压器，柴油机的高压共轨燃油系统、后处理催化剂及其载体、关键传感器等，我国核心零部件的生产企业创新能力不强，高新技术层面缺少竞

争优势。

4.1.4 产业结构不完善

低水平无序的重复建设现象仍很严重，行业内非理性的竞争局面没有得到根本的改变。由于受利益的驱使、资本市场的多元化、区域 GDP 增长等因素影响，致使水平性能低下的同类产品重复立项、重复上马建设的现象在局部地区较为严重，破坏了供需市场的和谐发展，阻碍了行业正常的发展和进步，更影响了中国内燃机产品及其配套主机在国际市场上的开拓与竞争。

4.1.5 测试技术与设备严重缺失

内燃机测试技术与装备严重缺失和落后，同样制约着我国内燃机工业持续健康发展。长期以来，我国内燃机行业的生产制造、试验检测等测试技术和测试设备依赖国外的现象非常严重，关键测试设备、关键传感器和仪器绝大多数需要进口解决，缺乏产品与零件的试验数据库和数据积累，关键零件的测试设备标准尚未建立，严重阻碍了自主创新能力的提高和新产品的发展。

4.1.6 新经济形势下的挑战

内燃机工业可持续发展面临着新的不平衡现象。新能源产业作为国家新兴战略产业，应该给予大力支持，但作为消耗我国石油能源 60% 以上的内燃机产品，在未来相当长的时间里，仍将作为支撑国家经济建设和满足市场需求的各类移动机械的核心动力，其主导地位不应动摇。特别是在国家节能减排政策中所承担的重要社会责任，更应该持续给予大力扶持。内燃机替代燃料推动产业多元化发展方面，仍然存在着认知和政策支持的问题，导致扩大研究的力度不足，试验研究范围不大，研究经费短缺的现象始终没有得到缓解。

4.1.7 政策支持力度不足

内燃机作为一个中间产品，面对上游的原材料供应，面对配套主机下游的终端产品，在国家各类支持政策、科技开发政策、管理政策、服务政策、拉动消费政策中所能获得的发展支持力度始终处于边缘状态。另一方面，又由于其消耗能源与排放污染的特性，致使各类技术法规、质量管理等强制性约束类政策直接对其提出十分严格的要求。此种局面导致行业在节能减排方面承担了很重的法规压力和社会责任，却在所获支持、扶持类政策中又始终处于游离和边缘的状态。

4.2 应对挑战的措施

为迅速提高我国内燃机产业的创新能力，提升产品竞争力，需要进一步加强

核心零部件共性技术研发平台建设，尽早改变当前被国外垄断的局面，提高核心技术（如高压共轨技术、电控单元 ECU、缸内直喷）的自主研发能力，早日突破技术瓶颈，实现关键零部件国产化并产业化，彻底改变核心技术受制于人、利润大都流入跨国公司的被动局面。

应鼓励国内有实力的内燃机企业积极参与竞争，积极实施“走出去”战略。一方面鼓励国内企业发动机及其零部件的出口，对国内企业海外建厂给予更多配套的政策扶持、业务指导和服务支持。另一方面，收购发达国家的发动机及零部件企业，迅速缩短与世界先进水平的差距。

“中国制造 2025”明确指出要推动以数控加工中心为主的数字化与柔性化的生产制造。而生产制造过程的信息化管理，对制造过程进行有效监控和管理，是提高产品质量的重要途径。与中国制造 2025 相一致，在内燃机行业组织实施绿色制造和智能化制造，提升行业总体实力，是中国内燃机工业从制造大国迈向制造强国的必由之路。在以推进智能制造为主攻方向的背景下，建立“领跑者”激励机制，加快产业结构调整，建立一批优势企业，提高全行业的综合竞争实力，继续巩固内燃机制造大国地位，实现产品生产制造智能化，推动行业提升信息化，在核心技术、关键基础零部件、先进制造工艺和新材料应用上缩短与国际先进水平的差距，有效提高产品质量和生产一致性，从而迈出中国内燃机工业发展中长期战略的第一步。

4.3 产品与技术

4.3.1 内燃机的智能电控技术

电子控制是发动机的核心和灵魂，发动机技术的发展实际上是伴随着电控技术的发展而实现的，没有先进的电控技术，各个阶段的节能、环保目标是不可能实现的。但目前国内先进的内燃机电控技术和产品基本上依赖国外供应商，尤其在控制策略、电控软件、ECU 及传感器、喷射系统以及标定技术等方面还存在很大差距。

随着国内内燃机工业的不断进步，国内企业也陆续开发了不同的电控系统软件和硬件，包括传感器、执行器等，应该说近年来国内供应商在电控系统软硬件方面取得了不小进步。但我们的软硬件基本是对标国外平台开发的，总体技术水平比国外落后一代到两代。

柴油燃油喷射系统基础较好，但汽油、特别是汽油直喷系统基本没有燃油喷射系统，制造精度和国外存在较大差距，主要体现在喷油量一致性差、喷射压力

达不到国外水平、系统耐久性差。建立内燃机工作过程控制平台，通过控制策略，实现整机与部件的“对话”，实现整机与配套底盘的“对话”，实现远程故障诊断。鼓励发展反映发动机重要参数的高性能、高精度、智能化传感器，如高精度压力、流量以及废气成分等传感器。鼓励发动机故障诊断技术的发展，特别是车载故障诊断（OBD）系统开发。

船用柴油机电控系统的开发还处于起步阶段，一些高校和研究所进行相关产品的研发，取得了一定成效，但与国际先进水平相比还存在显著差距：电子控制集成系统总体架构尚未充分优化，模块间的通信技术不能有效满足系统拓展需求，系统功能不够完善，与目前世界最先进的柴油机电子集成控制系统还存在较大的差距；在系统可靠性、硬件可靠性、软件可靠性等方面尚未开展深入研究，离产品研制所需的技术要求还有差距；我国依然使用机械式燃油喷射系统，最高喷射压力 160MPa，还没有自研的高压共轨系统产品投入市场。

船用柴油机高压共轨生产厂家主要有 L’Orange、Heinzmann、Bosch，最高系统压力能达到 220MPa，性能不断改善。Wärtsilä 和 L’Orange 合作开发出 W20CR、W32CR、W38CR、W46CR 系列高压共轨燃油系统，其中 W20CR 高压共轨系统采用齿轮传动的直列组合泵，适用重油，共轨压力 150 MPa，油泵工作转速为 800 ～ 3 150r/min，可以匹配多个系列机型。Heinzmann 提供的 ODYSSEUS 共轨燃油喷射系统匹配具备控制、监测和诊断功能的数字式发动机控制系统 DARDANOS，适用于不同大小的发动机、不同的应用领域和各种燃油品质，最高系统压力可达 220 MPa。德国 MTU 公司和 L’Orange 公司从 20 世纪 90 年代开始共同从事共轨系统的研发，为了满足 MTU4000 系列 20 缸新机型的需要，L’Orange 公司第二代高压油泵采用机油润滑直列式结构，在 140 MPa 压力下供油能力可达到 32L/min，目前系统压力能达到 180 ～ 200 MPa。

4.3.2 船用内燃机关键技术

国内船用增压器在基础技术、研发能力、产品水平与国外先进船用增压器差距明显。我国船用增压器产品处于国外 20 世纪 70 年代、80 年代水平，增压器单级最高压比 3.8，整机效率 60%。在消化吸收国外设计技术的基础上开展自主研发，在中、高速柴油机用增压器方面成功自主研发出 JT、JTH 系列产品，其技术水平达到 ABB 公司 20 世纪 90 年代水平，单级压比达 4.5，整机效率 62%，满足了近年来国内中高速柴油机批量生产使用需要。

目前，我国基本具备开展量产压比 5.0、效率 65% 以上的满足国内自主品牌

新一代大功率中高速柴油机用增压器的能力。在某些指标上接近国外先进水平，如试验室增压器单级压比达到 6.0，小批量混流增压器样机压比指标达到 5.5 等。

国际上船用大功率柴油机涡轮增压器设计和制造企业主要有瑞士 ABB 公司和德国 MAN 公司。就技术先进性、可靠性、系列化完整性和研发能力而言，ABB 产品代表着国际领先水平，主要体现在：增压器压比、效率不断提高，结构更加紧凑，轴承使用寿命不断提升，单台增压器匹配柴油机功率得到极大提高，智能控制在增压器中开始应用。ABB 公司推出的匹配高、中速柴油机的“A100H/M”系列，最高压比达到 5.8；匹配低速柴油机的“A100L”系列增压器，最高压比 4.8，整机效率 67%。近年来又推出 A200L 系列，将低速柴油机涡轮增压器的单级压比提高到 5.0，整机效率超过 70%。为满足更高压比需要，两级串联增压器压比已经达到 8.5，级间冷却后增压器效率达到 75% 以上。在增压器压比由 4.0 提高到 5.8 的过程中，气动噪声也得到很好的控制，并没有因为压比大幅提升而导致噪声大幅提高。

4.3.3 后处理技术

内燃机排气后处理系统是实现产品满足排放法规要求必要的技术措施，开发高效催化剂是系统的核心和关键。

我国在柴油机排放控制技术方面的研究起步较晚，主要通过两种方式对 SCR 技术进行研究：一是通过与国外系统供应商合作，二是自主研发，其中催化剂、测试传感器、主控单元等关键部件基本需要进口采购。

汽油机主要使用三元催化剂后处理技术，市场主要被跨国公司企业占有，其中主要为庄信、巴斯夫、优美科和日本陶瓷（NGK）4 家企业。2013 年生产的乘用车中合资车企 100% 采用外资公司提供的产品，自主品牌乘用车中 45% 的催化剂也为外资公司的产品。

Wärtsilä 公司 1992 年在瑞士至丹麦的火车渡船的主机 Vasa6R32F 中速机上采用了 SCR 技术，使 NO_X 减少 85%。目前 MAN 和瓦锡兰都有装设 SCR 装置的柴油主机在实船上应用。MAN Diesel & Turbo 为它所有的四冲程中速船用主机上，提供第二代 IMO Tier Ⅲ SCR 系统。我国在船用柴油机上的 SCR 技术刚刚开始。

4.3.4 低摩擦技术

提高内燃机的热效率，是降低能耗的主要途径之一。摩擦损失在内燃机燃料消耗中约占 10%，开展低摩擦技术的开发和应用，主要技术包括摩擦副材料优化选择、优化设计、优化微观质量控制和表面涂层技术、优化固体润滑涂层、优化

流体润滑剂，建立技术标准体系和推广应用。

国外高强化铝基合金取得较快发展，铝基合金由于不含铅，工艺较环保，性能接近铜基合金，部分铝基合金的工作性能已达到铜基合金，从而获得较快发展。另外，表面涂层无铅化、环保化、高性能发展趋势明显。

国内在传统铝基合金材料方面技术已较成熟，但在高锡铝合金、新型高性能铝合金方面受冶炼、复合轧制技术等因素制约，易产生疏松、夹杂、偏析、结合质量不良等缺陷，可靠性不高，与国外相比还存在较大差距。

中速机铜铅合金电镀轴瓦国内技术成熟，被广泛应用；非金属喷涂轴瓦、真空溅射轴瓦技术国内正在研究，目前依赖进口；合成涂层铝基合金轴瓦在中低端柴油机有应用，但不能满足高强化中速机的要求。

4.4 核心零部件

燃油系统、滤清器、增压器、后处理装置以及机油泵、水泵等部件，对内燃机的燃油消耗、CO_2 排放、排放有害产物浓度都有至关重要的影响，这些关键零部件的设计、制造水平和应用匹配水平，从很大程度上左右着内燃机行业的技术进步方向，对内燃机行业的可持续发展有决定性作用。

4.4.1 燃油喷射系统

发动机是以燃料燃烧释放热能，再把热能转化为机械能的动力装置，以柴油为燃料的压燃式发动机简称柴油机，以汽油为燃料的点燃式发动机简称汽油机，另外还有其他燃料的发动机。无论是柴油机还是汽油机其核心部件都是供给燃料的燃油喷射系统，其控制方式都经历了从机械控制方式向电子控制方式的转变，目前适应柴油机排放和油耗指标要求的燃油喷射系统有电控高压共轨、电控单体泵及电控泵喷嘴等，欧美等发达国家的技术发展表明共轨系统将是未来满足更高排放法规和燃油经济性的唯一选择，而汽油机从电控开始经历了单点喷射、多点喷射和缸内直喷三个技术发展阶段，目前欧美汽油机的燃油喷射系统全部采用缸内直喷技术。

2015 年 1 月 1 日，国家已经实施车用柴油机国Ⅳ法规，原来统治柴油机燃油系统的机械式油泵油嘴已经退出历史舞台，非道路国Ⅲ标准也已于 2016 年 4 月 1 日实施，以国内企业为主生产的传统机械产品几乎没有新的其他市场空间，因此电控高压燃油系统产品国内装机量与以往相比必定会有大幅增长，由于短期内国产系统的技术和产能状况，国外品牌的电控产品将供不应求，占据大部分的国内配套市场。

汽油机整车已实施国Ⅴ排放法规，由于国外竞争对手的汽油喷射系统技术成熟、性价比高，国内企业应该直接研发缸内直喷系统，尽快赶上先进水平。

燃油喷射系统按照燃料可分为柴油机燃油喷射系统和汽油机电控燃油喷射系统。我国的电控燃油喷射技术研发起步晚，大多数企业还没有完全掌握核心技术，还没有很好地解决工艺技术问题形成规模化生产，因此国内只有少数企业拥有自主技术。这种状况难以撑起国内市场上对燃油喷射系统的需求。

1. 柴油机燃油喷射系统

柴油机燃油喷射系统与国外先进水平还存在一定的差距。具体体现在以下几个方面：

（1）电控高压燃油喷射系统研发起步晚，对关键技术理解有待提高　相比于欧美起步于 20 世纪 80 年代初的电控燃油喷射系统研发和 90 年代批量生产，我国电控产品的研发落后将近 20 年，这个差距造成目前对电控高压燃油喷射产品开发和验证时间不足、关键技术理解不深。

（2）产品设计研发能力不足，正向设计手段还需完善和提升　电控高压燃油喷射技术是集机械、流体、电磁设计技术和电控传感技术于一体的多学科交叉技术。国内从2010年开始逐步实施正向设计工程，在设计过程中注重计算和仿真，建立模型，但模型的标定和应用还处于起步阶段，同时关键开发测试设备条件也与国外竞争对手有很大差距。

（3）产品技术性能指标和一致性可靠性有一定差距　国外产品已达到 2 500bar 的稳定喷射压力，正在研究喷射压力为 3 000bar 的燃油系统，国内目前只能生产喷射压力为 1 800bar 的电控燃油系统。高压油泵的供油效率、喷油器电磁阀响应速度、每循环喷射次数、喷射过程中压力的稳定性、可靠性寿命等技术指标国外系统都有明显的优势。

（4）关键工艺技术开发有待解决　电控高压燃油喷射系统的高压密封和高速响应及可靠性是关键的设计要求，而关键工艺技术如加工 120 μm 微孔（与头发丝相当）等工艺开发，是保证这些设计指标的必需条件，包括热处理技术、涂层技术、超精加工技术、超精检测技术、微孔加工技术、微孔液磨合流量检测技术、边缘工艺技术、装配检测技术等，这些技术都有待解决。

（5）关键零部件和原材料依赖国外进口　轨压传感器、进油计量阀、ECU 芯片、氮氧传感器等关键零部件，磁性材料、高强度合金材料等关键原材料，目前主要依赖国外供应商，国内企业的研发及生产能力尚无法满足行业需求。

（6）系统集成开发标定能力有待提高　燃油系统机械部件的功能和电控单元的集成控制是核心技术，国外跨国公司都有很强的机械和电控集成开发控制能力，而国内企业大多生产组织分散，集成能力不足。涉及发动机、整车及后处理的标定来满足动力性、经济性和排放要求的系统标定技术也需要时间逐步完善。

2. 汽油机燃油喷射系统

目前我国汽油机燃油喷射系统与国外的差距和问题主要体现在以下方面：

（1）国内整体内燃机技术起步晚，工业基础不扎实　2000 年，国家面对环境污染压力，下决心治理汽车尾气，决定汽油发动机的轿车都必须使用燃油喷射系统，而当时国内生产的轿车所使用的燃油喷射系统从 ECU、供油系统到执行器，90% 以上都是国外的产品，几乎被国外的博世、德尔福、电装等一些公司所垄断了。

（2）企业技术不成熟，质量有待提高　现在国内大多数企业虽在逐步发展，但自身掌握的技术有限，很少有属于自己的原创技术，直接影响到产品和技术研发；同时一些企业进行低水平竞争，产品在稳定性和一致性上却达不到国外的一流水平。国内的汽油机燃油喷射系统制造企业要跟上国际的步伐，首先要从设计开发、制造工艺、质量控制、售后服务等环节入手，提升自身产品的质量。

4.4.2　增压器

内燃机增压的作用是在有限的排量限制下向气缸内充入更多的新鲜空气，采用增压技术可以改善燃烧过程，提高内燃机的动力性和经济性，降低排放污染物。目前，我国已建立了较为完善的增压器生产体系，但与国外先进水平相比，还存在较大差距。

1. 总体技术水平的差距

国内增压器企业在主机厂的认可度有待提高，在用户中处于“二供”或“二配”的地位问题。国内增压器企业不能在第一时间获得与主机同步开发的机会，只有等到国外增压器企业已经匹配成功后再参与“二配”，很是被动。由此带来无法参与或建议主机参数或结构设计（能力不强也是一方面）、自主创新技术不能得到应用、受制于已经形成的结构或尺寸制约等问题。系列化水平低，导致配机样件提供不及时，没有现成的储备系列产品样机甚至图样。

压气机叶轮和涡轮叶轮是增压器的核心部件，其气动性能决定增压器的性能。而国内在气动元件设计方面还是以仿制为主，叶轮系列化程度有待完善。增压器与内燃机匹配及测试技术还有待开发。

2. 应用技术的差距

为了适应柴油机对低速性能和响应性的要求，涡轮增压器在增压系统调节，特别是可变几何涡轮技术方面在目前的基础上还需要在变工况涡轮性能和涡轮调节机构可靠性提升方面继续开展技术攻关工作。

在乘用车涡轮增压器的应用中噪声问题突出，可能有设计方面的问题，也可能是加工的一致性问题。主要应该在气动噪声、机械振动噪声、转子动平衡和生产加工工艺等方面开展研究和技术开发工作。

增压内燃机的经济性与增压系统的气动性能关系密切，国内的系列化高性能增压器叶轮设计方面还有较大的提升空间。

轴承转子系统对涡轮增压器的可靠性具有重要影响，目前国内增压器生产企业已经认识到这一点，应该加大研发力度，提高自主设计能力。

3. 测试技术的差距

测试方面的问题主要是测试项目和测试手段不够完善，涡轮增压器的测试标准还有待进一步完善和体系化。在产品研发阶段的性能测试和产品出厂的一致性及可靠性检验等方面，例如增压器机械效率测试、增压器冷却水流量特性测试、高周疲劳测试、压气机端和涡轮端漏气量的测试、止推轴承轴向力测试、热冲击试验等都有待提高。

存在上述差距的原因主要是由于国内企业包括数据资料、技术能力和产品开发等方面的积累不够，造成产品开发速度慢，客观上由于人力、物力和财力的制约，疲于应付当前市场需求，难以形成系列化增压器产品，不能及时在库里选取产品型号向主机厂提供匹配样机。

4.4.3 滤清器

欧美发达国家对于内燃机滤清器的研究紧紧跟随着内燃机先进技术的发展和应用，在可靠性、集成化、电控化和相对低成本等方面开展了大量工作，整体技术水平领先于发展中国家。我国需要针对油品和使用环境的特殊性，开展大量的应用技术研究和开发，保证内燃机运行的更加有效和可靠。与国外发达国家相比，我国的滤清器行业主要存在以下差距：

1. 标准滞后

产品的标准是产品技术水平的重要体现。长期以来，国内滤清器行业的技术标准一直沿用传统发动机的技术要求，滤清器企业的技术发展与发动机企业的发展脱节，技术标准发展比较迟缓。整个行业对于国际标准的新变化和新动态响应

慢，国内标准相对滞后。

2. 应用研发薄弱

滤清器产品属于多学科交叉、发动机匹配应用度较高的高技术产品，其技术水平取决于基础研究的水平。国外的滤清器企业和滤纸企业，在基础的过滤介质开发上投资很大，不断和发动机厂家协同合作，投入大量人力物力，开发先进过滤介质；国内企业在滤清器的基础过滤介质、新型材料、生产制造工艺、模块化集成技术、测试技术的研究方面，投资力度偏低，科研设备落后，加之我国存在滤清器研究与发动机技术升级脱节的现象，产业分散度大，技术认知度差，国内滤清器企业几乎没有协同内燃机厂家进行应用开发的能力。

3. 协同开发不够

车用滤清器产品作为与内燃机匹配应用的零部件产品，相关度很高，这就要求滤清器企业具有协同开发的能力，内燃机企业在开发新型发动机产品的同时，也和滤清器企业做好协同开发的沟通和准备。协同开发使得产品的设计、实验和试制等阶段的工作与发动机的开发阶段紧密的结合，企业缩短了产品开发周期，又降低了研发费用。国外滤清器企业和内燃机企业、过滤介质生产企业合作紧密，对于新技术发动机平台的滤清器产品协同开发。

4. 制造技术水平低

主要体现在生产线建设、机械加工、防错技术、计算机集成制造和工厂自动化等方面。国内滤清器的生产线自动化程度低，在线防错和计算机集成制造基础薄弱，特别是针对折纸、焊接、密封性测试等关键工序的设备，大都采用国外先进设备。

制作工艺技术的研究和滤清器产品基础技术研究情况相同，在计算机辅助工艺设计能力、新材料加工工艺、高效自动加工工艺、生产物流和工艺技术信息化的研究上，与国外滤清器企业存在较大差距。

5. 基础材料差距

滤清器的技术进步和基础材料有密切的关系，过滤介质和塑料等新材料的开发对滤清器的结构、性能、可靠性影响很大，而过滤介质和塑料等新材料作为滤清器的基础材料包含了高分子化学、高分子物理、材料科学等多项学科，属于技术含量极高的产品。滤清器对于材料的性能以及质量等参数的稳定性有很高的要求，只有同时具备最充分的基础科学理论的支撑、最先进的基础工业技术的保障及最精细的工艺操作和最严格的管理三大要素才能生产出高质量的滤清器。

6. 产业集中度低

我国滤清器生产企业有 3 000 多家，规模以上企业仅仅有 30 家，实现年销售收入 50 亿元左右，大都实力不强、市场开拓不力，多数企业是低水平的重复工作，处在生产的初级阶段。国外滤清器企业集中度较高，规模经济效益高。以曼胡默尔集团为例，2014 年实现销售额 28 亿欧元，远超过国内所有的同行。

4.4.4 后处理器

在后处理行业发展中，可以用“起步晚、差距大、机会少”来形容我国后处理行业的现状；围绕后处理技术，虽然国家相关部门设立了若干期的科技支撑项目以及“863”项目，也有包括清华大学、吉林大学、四川大学、厦门大学等高校和研究院所积极开发相关技术，但是，车用后处理技术涉及大量的基础研究积累，是材料学、材料化学、热力学、动力学、燃烧学、电子和系统科学方面的集成，也依赖于整机整车的试验和匹配标定，因此，要实现核心技术的掌握和技术创新，具备较大的学科难度。到目前为止，仍面临不小差距，存在不少的问题：

1. 高效后处理用载体缺失

目前，我国车用后处理行业所用的载体可以分为金属载体和陶瓷载体两大类。金属载体在商用车和乘用车上应用很少，仅限于一些进口高档车原配后处理器，例如奥迪、宝马系列等，绝大多数应用于摩托车行业，摩托车金属载体后处理器已经实现 100% 本地化企业生产制造，以台州欧信和南京亿达为代表， 2015 年产量统计超过 1 000 万 L，但是，所用的铁铬铝金属箔片仍主要依靠日韩或德国进口。我国的国Ⅳ国Ⅴ商用车和乘用车后处理器所用的载体几乎 100% 是陶瓷载体，其中 85% 以上的市场份额被美国 Corning 和日本 NGK 所垄断，国内仅有萍乡恒昌、萍乡南翔、无锡王子等中小企业生产供应能用于乘用车的小尺寸的陶瓷载体。生产大尺寸高强度的商用车后处理载体的难度在于载体的高开孔率和薄壁化，这是一个互相矛盾的指标，特别是目数在 400cpsi 以上而且孔道的壁厚在 0.1mm 以下的高档载体是未来国内企业工艺技术攻关的重点。此外，在服务于未来国Ⅴ、国Ⅵ的细微颗粒物净化处理的 DPF 载体市场上，由于国内企业动手较晚，目前的市场 90% 以上被 Corning 和 NGK 两大公司所垄断，国内的某些中小企业，例如北京奥福、贵州皇帝、北海辉煌等企业，在产品规模以及试验匹配经验上存在明显的缺陷，不仅无法与国外公司抗衡，而且生存艰难。

2. 工艺水平亟待提高

近年来，国内后处理行业催化剂专业领域的研究成果推出处于停滞状态，近

年来国内也没有高水平的科技论文发表。催化剂是高技术学科，附加值高，因此，国际性的大公司，例如巴斯夫、庄信、安格、优美科等跨国公司都已在国内建厂，它们采用成熟产品组织生产，把市场开拓的经验直接移植到中国，迅速地建立网络和渠道，占领国内市场。国内的昆明贵重金属研究所、四川中自汽车后处理以及无锡威孚等中小企业几乎没法同跨国公司进行技术和市场的竞争。

对于汽油机来说，三效催化剂的研制成功使其排放污染问题已经基本得到解决；柴油机由于其排放污染物成分和条件更加复杂，DOC、DPF 和 SCR 的多种技术要组合应用。这些催化技术对减少汽车尾气的排放发挥了很大的作用，但是随着汽车尾气排放法规的进一步严格，如欧Ⅵ或超低排放标准、油耗和 CO_2 的限制以及燃油发动机（缸内直喷、涡轮增压等技术）的变化，汽车尾气污染物的种类和净化要求也变得更为复杂，如 CH_4 被列为新的污染物、耐久性的提高、颗粒物的排放计数由质量变为数量等。为适应新的形势发展，迫切需要高效的汽车尾气催化净化治理技术。

我国对汽车催化剂的研究与开发已有近四十年的历史，在催化剂配方和制备技术方面发表了大量文章并获得了数十项中国专利。其中，昆明贵金属研究所、北京工业大学、中国石油大学、清华大学、华东理工大学、四川大学和浙江大学等做出了卓有成效的研究工作，促进了我国汽车催化剂产业的发展，使汽车催化剂制造商掌握了满足国Ⅳ／国Ⅴ标准的催化剂生产技术。但是，自主生产的汽车催化剂性能和产品一致性还与国外产品存在一定的差距，造成我国自主研发的催化剂还未能大量进入国际合资品牌汽车配套市场的严峻形势。

3. 应用和检测评价体系缺失

催化剂器件设计及应用与整车紧密相连，与汽车企业的配合紧密相连。汽车催化剂不是单独发挥作用的部件，而是与整车发动机、电喷系统匹配的系统工程。每次排放法规升级都带来发动机系统升级，发动机平台变化、车型平台变化都会使催化剂排放和控制特点发生变化，因此催化剂与发动机的匹配具有很强针对性，无论国内或国外汽车催化剂企业，汽车催化剂应用技术研究都是非常重要的技术工作，否则无法发挥催化剂的最佳性能。

国外企业欧Ⅴ／欧Ⅵ技术储备早于中国，积累了大量整车配套的经验、数据和方法，国内的国Ⅴ催化剂匹配工作 2012 年才刚刚起步，针对不同车型、不同发动机特点的规律性研究数据不足并有待归纳，国Ⅴ整车耐久性模拟测试方法和 OBD 件模拟测试方法尚未建立。行业需要加以研究，缩短开发周期，为我国国

Ⅴ／国Ⅵ催化剂建立一套科学完整的整车模拟评价方法。

国外催化剂企业和汽车企业均具备先进、系统的汽车催化剂检测平台，包括催化材料表征、小样评价系统、发动机台架评价系统、整车评价系统等，国外各汽车企业在催化剂检测方法和装备方面有不同的标准和要求，其具备很强的催化剂品质测评和控制能力。国内催化剂企业进入国外车企，必须先具备可满足国外车企对催化剂检测要求的平台，以及可按国外车企要求的检测方法自评估催化剂的能力。国内催化剂检测研发平台较为分散，大部分催化材料表征分析设备集中在高校，部分国内催化剂企业虽同时具备催化材料表征设备、发动机台架评价设备、催化剂物理性能评价设备等基础设备设施，但是基于国标的设备功能无法满足国外车企提出的多种检测方法、检测条件。这些问题包括国内发动机台架缺乏整车老化模拟关联模式、缺乏多组合柴油机后处理催化剂评价测试装置和方法、缺乏催化剂热冲击试验装置及方法、缺乏抑硫模拟检测装置和方法等等，尤其是应对国Ⅴ第Ⅰ阶段，国内仅有少数几家单位具备颗粒物排放数量和质量的检测能力。这些条件的缺失已制约国产催化剂进入高端客户市场，也限制了更高标准催化剂研发的深入。因此，我国需要加强国产催化剂企业研发检测平台能力建设，完善国际化标准的基础设施建设，获得国际高端市场准入资格。

4. 国产基础元器件配套低

车用后处理完整的系统中，最容易实现自主制造的是封装壳体的材料和工艺，这同我国是制造大国密不可分，但是这部分的附加值很低；在完整的后处理系统中，除载体和催化剂高附加值的部分之外，就是各类元器件和传感器，例如ECU/DCU 的软硬件、各类传感器、计量和控制系统以及管件等；以 NO_X 传感器为例，传感器载片上涂覆的活性材料仅 0.2g 左右，其售价从单件的 3 000 元／件，到目前的 10 万件以上的批量订货的 1 100 元／件，市场被 NGK 和大陆公司联合垄断；总体来看，从目前氧传感器和氮氧化物传感器，从未来的 NH_3 传感器和 PM/PN 传感器，本地化的产品仍无法获得竞争地位。

5. 先进性不足

后处理技术的发展与排放政策和法规的引导方向息息相关，反之，排放政策和法规的制定和实行也需要先进后处理技术手段的保障与支撑，二者相辅相成。我国起步晚，技术手段落后，经过近 40 年的发展，已经培育和发展了一批以兼顾时凯龙、昆明贵研、无锡威孚、四川中自等企业为代表的国内知名的后处理技术研发和生产制造企业，已具备成熟的可满足国Ⅳ法规的 TWC、SCR、DOC 和

DPF 技术，部分企业甚至已完成满足国Ⅴ排放标准的尾气排放控制技术的开发，但这些企业仍是以学习国外技术为主，在前瞻性和开创性研究方面仍与国外企业有较大差距。

目前，国外已具有成熟的欧Ⅵ排放后处理产品，2014 年 9 月欧洲出厂新车已全面应用欧Ⅵ催化剂产品。我国相关后处理技术还处于起步研发阶段，汽油车低温冷启动阶段的排放控制、稀燃条件 NO_X 控制及 GDI 发动机颗粒排放控制作为未来国Ⅴ阶段重点需求的后处理技术尚缺乏相应的支撑。尤其是对汽油车排放颗粒物控制的 GPF 技术的研究国内尚属空白。柴油车领域，柴油车后处理技术路线将从国Ⅳ / 国Ⅴ阶段的轻型车 EGR+DOC（+DPF/POC）和中重型车用 SCR 技术路线，向国Ⅴ / 国Ⅵ阶段 DOC ＋带催化涂层 DPF+SCR 路线过渡。目前我国针对单类污控装置（如 SCR 或 DOC）的催化剂制造技术和应用技术较多，在满足国Ⅳ标准的 DOC 催化剂、POC 催化剂和 V 基 SCR 催化剂方面具有相对成熟的产品技术和生产能力；而应对国Ⅴ阶段，CDPF 催化剂技术、分子筛型 SCR 催化剂技术、SCRF 技术、四元催化技术等高端产品技术才刚刚处于起步研究阶段，满足国Ⅴ标准要求的检测平台也急需升级，组合型污控装置与整机的集成技术和经验都非常缺乏。

6. 上下游产业发展不平衡

汽车催化剂产品涉及多个行业、产业的领域技术，如上游涉及提供催化剂载体的陶瓷、金属材料产业，提供催化涂层的氧化铝、稀土及贵金属等原材料产业，下游涉及催化剂封装的机械、排气系统产业，催化剂应用的发动机、电控标定产业。由于行业差异大，技术跨度宽，使得产业链上各个产业发展极为不平衡。

1）高水平、高性能的汽车催化剂载体产品技术水平仍需突破。陶瓷载体 85% 以上的市场份额仍然被美国 Corning 和日本 NGK 所垄断，国内仅有宜兴非金属、中鼎美达、北京奥福、无锡王子等少数几家中小企业生产仅能满足国Ⅲ、国Ⅳ阶段的催化剂产品，在高孔目数、薄壁、耐热冲击性等未来法规需求的高性能产品方面仍存在较大技术壁垒，在产品的一致性、稳定性和过程控制能力方面与两大巨头仍有较大差距，不仅无法与国外公司抗衡，而且生存艰难。

2）高耐久、高稳定性的稀土、氧化铝和钨钛等原材料产业整体技术水平落后，与国外差距较大。目前国内尚无专业的稀土催化材料、钨钛材料等生产企业，国产稀土催化材料市场占有率低，且存在规模化产品一致性不稳等问题。国外材料企业还未本土化，产品价格昂贵，不健全的原料产业链使我国汽车催化剂产业发

展面临原料技术和价格的双重壁垒。

3）系统集成和标定技术仍为国外垄断。目前这一行业仍以博世、德尔福、大陆等国外公司为主，国内也有一些小的标定公司或高校开展相关研究，但均未形成规模，我国仍未真正掌握系统标定技术。

产业链上各行业技术、产业制造水平发展的不平衡极大地制约了后处理行业的发展，也是未来“十三五”期间急需解决的问题。

7. 缺乏数据库建设

数据库的建设对于实现产品的系列化和标准化非常重要。新材料将成为后处理零部件发展的推动力，迫切需要建立材料数据库。发达国家的材料数据库一般有一个公共权威机构测试并发布，成为公共资源（如德国 IMA），对于材料特殊性能，由材料使用者测试这部分特殊性能，并持续更新（如美国三大汽车公司的材料性能数据手册）；国内的材料数据库还没有建立起来。建议对材料公共数据进行测试并建数据库管理，对于材料的特殊性能应由材料用户主导、社会第三方实验室测试并管理数据库，使之成为行业的知识仓库。

4.4.5 水泵、机油泵

1. 水泵

节能环保法规日趋严厉，汽车制造向小排量、大功率涡轮增压和混合动力方向发展，冷却水泵向高效率、轻量化、集成化方向发展。当水泵输出功率被要求在 400W 以内时，ECU 控制下的智能电动变量水泵技术将会得到应用，水泵的智能化进一步提升，市场前景广阔。

近年来电动水泵，可变流量水泵在国外车企部分车型得到应用，核心技术还掌握在外资企业中。目前，西峡水泵、富奥制泵、东风泵业等国内比较有实力的内燃机水泵制造公司均在积极开发该类产品。

2. 机油泵

国内机油泵行业经过多年的发展，已形成了完整的研发和制造体系，在传统油泵技术领域已处于市场主导地位，研发能力显著增强，可变排量、电控等新技术领域发展迅速，但在电磁阀、无刷电机、高压柱塞泵领域与国际一流品牌还有明显差距，产业基础还比较薄弱，目前汽车油泵行业正处于非常关键的发展阶段，主要表现为：

1）传统中低压内燃机油泵竞争优势明显。传统中低压内燃机油泵是指以齿轮泵和转子泵为代表的定排量油泵，可靠性高，抗污染能力强，在发动机润滑系统、

变速箱液压系统和燃油输送系统尤其是商用车领域的应用十分广泛，湖南机油泵股份有限公司作为代表性公司，拥有非常完备的新产品开发能力，产业环境十分成熟，在国内商用车机油泵市场占有率超过 50%，国际市场发展也十分迅速，相继与美国康明斯（美国、英国、巴西和日本工厂）、美国卡特彼勒、意大利菲亚特、德国道依茨、瑞典斯堪尼亚、德国 MTU 等十多家国际主流发动机客户配套和合作。

2）齿轮泵和转子泵朝着低摩擦、低成本、高效率、高可靠性、高压力输出和小型化领域进行精益设计和精密制造。因为清洁度更容易保证，变速箱油泵和燃油输送泵可以通过更精密的配合来提高压力输出和容积效率。

3）叶片泵进入成熟应用阶段。随着变排量技术的发展，叶片泵通过增加叶片定位支撑环、材料选配、间隙优化等措施提高了抗污染能力以及热怠速工况机油压力表现，因为其优异的变排量性能和更好的匹配点效率逐渐成为机油泵开发的首选。

汽车油泵控制技术快速发展，电磁阀、无刷电机等核心部件尚依赖外资品牌。节能减排的巨大压力推动了汽车油泵控制技术的发展，无刷电机直接驱动节油潜力最大。可变排量、两级压力控制、MAP 控制等针对非电驱机油泵进行的节能减排设计成为现阶段机油泵控制技术重点。

通过开关电磁阀控制的可变排量机油泵可以实现低压（低速）和高压（高速）两级压力控制和可变排量，通过电液比例阀控制的可变排量机油泵可以实现多级压力控制和可变排量，相对于开关控制而言，可以补偿机油温度变化的影响，小功率的汽车油泵采用无刷电机直接驱动获得了广泛的研究和应用。

4.5 制造工艺与装备

“十二五”期间我国内燃机行业在制造工艺和装备方面有了很大的提高，通过有针对性的技术改造，内燃机整机和零部件大中型企业总体制造水平提高很快，已开始步入从量的发展转向质的提升阶段。随着内燃机先进的薄壁高强度铸造技术、精密铸造技术、柔性及半柔性加工技术、在线自动检测技术、柔性装配技术的发展，各种先进的零部件制造工艺和装备工艺在国内行业中得到了普遍的应用，确保了产业化生产加工过程中产品一致性的需要。一些大型龙头企业的工艺和装备水平已被公认为属国际一流。但内燃机品类繁多，部分产品及零部件的制造工艺与装备水平仍处于较低水平。

4.5.1 铸造

内燃机铸造技术，特别是大批量流水线生产的现代化铸造技术往往代表一个

国家铸造及相关材料工业、技术装备工业的发展水平。我国铸件总产量2015年位于世界第一位，2015年我国各类铸件总产量将达到5 000万t，约占世界总产量的47%；其中汽车和内燃机类铸件约占37%。我国已成为铸造大国，但与铸造强国的差距还很大，除少数骨干企业生产技术水平较高外，铸造行业整体装备、技术和管理水平落后，铸件质量低，材料、能源消耗高，经济效益差，劳动条件恶劣，污染严重。

1. 节能环保水平差

由于发展模式不同，国外铸造企业在提高铸造技术的同时也非常注重节能与环保，国内铸造企业存在高消耗、高污染粗放型发展模式，特别是一些中小型企业，单位产量铸件能耗高于国外先进水平70%，废气量和粉尘量排放产生尤为明显。在造型、浇注、制芯、砂处理和清理等方面，车间整体的除尘通风等环保设备配备较弱。树脂砂、制芯、浇注等过程产生的有害气体较多，生产作业环境较差。

在内燃机产品铸造过程中，金属的熔炼、热处理及型壳焙烧炉、热法制芯、清理等工序的耗能较高，我国每吨铸件的平均耗能量是国外发达国家铸件耗能量的1.2～2.0倍，铸造生产消耗的能量占机械工业总能耗的25%～30%。

2. 铸造技术与设备落后

尽管国产铸造装备有了一定的发展，但企业间差距仍较大。国内骨干内燃机企业关键设备引进国外先进装备，相关设备国内择优配套，绝大多数中小型铸造企业，技术装备相对落后，成品率低。国产装备和国外先进装备之间还存在一定的差距，主要体现在熔炼、造型、制芯、砂处理、砂再生、清理、合金材料应用和新技术开发应用等领域。

国内大型熔化设备已经接近世界先进水平，但未得到广泛应用。国产熔炼设备的关键电器元件引进后，中频炉的总体水平已满足生产要求，熔化效率都有提高，大型、先进、可靠的冲天炉仍然依赖进口。

国内造型设备的先进性、稳定性和可靠性均落后于国外先进设备。以静压造型线为例，国内往往引进主机，配套国产辅机，铸型质量一致性方面仍有不足。树脂砂造型设备的技术水平与国外先进水平也有一定差距，主要表现在自主研发能力差、质量不稳定、设备可靠性低等问题。消失模铸造存在适应性差、应用范围小的问题。国内开发的精砂工艺生产内燃机类铸件，在降低能耗、增加铸件尺寸精度和表面粗糙度上有优势，但由于设备投资较大，产品工艺技术不尽成熟，应用领域还不广。

制芯装备方面，仍以耗能较大的热芯制芯工艺为主。冷芯制芯设备主要有德国兰佩冷芯制芯机、西班牙洛拉门迪制芯中心、日本浪速等。我国制芯设备多以生产小型或单机制芯机为主，生产大型冷芯机的企业较少。

型砂处理装备与国际先进水平基本一致。随着造型线对砂质量要求的不断提高，国内知名铸造厂普遍引进了大容量高速混砂设备。

型砂再生装备和处理技术方面，缺乏行业规范和标准，再生企业良莠不齐、分布散乱。再生工艺、质量、设备、技术、能耗等参差不齐，粉尘、废水、废气等二次污染严重。

在铸件清理装备方面，国内大型铸造企业选用关键清理设备配套清理线，实现铸件的不落地清理。辅助清理和清理机器人以及内腔专用抛丸清理机等技术未得到广泛应用。铸件的稳定性和一致性差异大，铸件品质与国外相比差距较大，如尺寸精度、表面粗糙度比国外差1～2级；我国复杂铸件的不良品率在10%左右，国外复杂铸件的不良品率≤5%。内燃机铸件的缸体缸盖类产品，国内大型铸造生产企业将废品率控制在3%，多数中小型企业废品率较高。

整体来看，我国生产高技术含量、高附加值、具有自主知识产权、享有国际声誉的铸件产品较少，铸件技术含量和附加值较低，缺乏必要的实验室和检测手段。近年来，很多的铸造企业致力于开发高新技术、自主技术的产品，专业化生产优势得到进一步体现。

4.5.2 机械加工

1. 柔性生产线应用水平不均衡

目前，国内气缸体加工以柔性生产线为主，并分为以下3个层次：达到国际先进水平的柔性生产线，主要采用Heller、Grob、MAG的高速卧式加工中心组成；达到国内先进水平的柔性生产线，主要采用日本牧野、韩国斗山、沈阳BW的高速卧式加工中心组成；国内普通水平的柔性生产线，粗加工主要采用国产卧式加工中心或者立式加工中心，精加工由卧式加工中心完成。同时，单缸柴油机、中小批量的柴油机生产线仍以组合机床、通用机床及引进专机组建的流水线为主，除少量工序采用加工中心外，整体柔性化程度较低。

2. 自动化程度普遍较低

目前，国内的柔性生产线已普遍采用辊道实现工件工序间的输送，部分企业采用桁架机械手或机器人上下料，实现全自动生产，杜绝了操作工人对生产线的影响，进一步提高了加工质量的稳定性，但更多的企业仍采用起重机起吊和人工

上下料方式，自动化程度普遍较低。

3. 缺乏信息系统

自动线 CNC 控制系统既要控制工艺装备系统，又要控制物流系统，实质属于工厂自动化范畴，其复杂程度不是只控制单台机床可比拟的，世界上只有少数几家顶级公司有此能力，我国目前空白。

4. 关键工序设备仍需引进

长期以来，大部分国内内燃机制造厂仅将国产数控装备用于缸体、缸盖的粗加工和半精加工，精加工工序绝大部分采用进口设备。国内装备制造业与内燃机制造企业在研发制造领域联系不够紧密，面对内燃机制造企业生产中存在的问题，不能及时解决，生产企业不得不购买国外设备。关键零部件加工、柔性自动线还没有真正实现产业化。目前，日本、德国和美国靠其掌握的高精度数控机床核心技术，形成了技术和市场的垄断局面，国际市场占有率达 90% 以上，我国内燃机的柔性生产自动线，几乎全都从国外进口，庞大的中国内燃机制造业、高档机床和关键工序的关键机床被国外厂家垄断，严重阻碍了国产汽车发动机关键零件高档数控加工装备的发展。

面对这种状况，国家先后出台多项措施大力扶持装备制造行业，一些走在前列的国内机床制造商已经开始了针对内燃机气缸体、气缸盖等关键零部件的高效加工机床的研发，对生产线的部分关键技术展开研究，国产设备日趋成熟，但关键工序设备在加工精度、可靠性、稳定性上仍与进口设备有较大差距。

5. 工艺设计能力较差

国外设备公司工艺设计能力强，可以实施整线承包服务，国内仅东风设备制造厂等少数公司具备整线承包服务能力。其中柔性夹具设计更是国内制造企业的软肋，这要求夹具供应商精通内燃机制造工艺。而国外发动机生产线供应商正是掌握了内燃机制造工艺，其柔性夹具价格才能够卖得极高，同时也是其能大量承接国内“交钥匙”项目的关键。

6. 辅机水平尚待提高

内燃机制造清洁度已经成为内燃机产品在使用运行过程中导致早期磨损和诱发燃油供给系统及润滑系统故障的主要因素，进而影响内燃机的动力性、经济性、环保性、可靠性指标的稳定和使用寿命。目前，国内企业已普遍选用具有浪涌清洗、升降插管扫描清洗、真空干燥等功能的全自动专用清洗机，部分企业使用德国 DURR、日本岛田等引进设备来保证产品的清洁度，但仍有大量企业采用普通

通过式清洗机，清洁度难以有效保证。

7. 现场质量控制技术日益完善

国内制造质量控制已开始从“开环监测”向“闭环反馈”转变，为保证产品的“精确追溯”，国内企业纷纷加强了现场质量控制，零件二维码追溯系统应用越来越普遍，质量信息联网实时监控以及先进的零件数据载体、即电子芯片技术也在一些主流企业得到了应用，但总体发展程度较低。

8. 生产性服务业发展滞后

以刀具为例，由于企业主要精力仍在保证产品加工精度上，所以对刀具的研究不够专业，如某刀具实际寿命可能是 1 200 件，但可能出于对产品加工质量的保险考虑，可能在加工到 1 000 件时就被换掉了，造成了浪费和换刀频次的增加。国外部分企业则将刀具管理整体外包给专业公司管理，全面提供刀具采购、库存管理、修磨、清洁调整、配送等成套的服务，使企业可以更专注于核心竞争力的提升。

4.5.3 装配试验

内燃机的装配工艺过程是将各种零件、部件、合件等按规定的技术条件和质量要求联接组合成完整产品的生产过程，主要包括物流存放、输送上线、紧固连接、油辅料加注、功能调整、性能检测等。

由于现代内燃机向轻量化、小型化、低排放、电子化、集成化的方向发展，产品结构和功能的集成化、通用化和标准化要求，引起内燃机的装配试验系统适应性变化，装配试验系统要求越来越高，不仅需要设备的保证和多种信息系统的支撑，而且还要有完善的质量体系。

1. 装配操作的差距

目前国内传统内燃机装配大多采用手工操作加少量自动及半自动装配测试设备的方式，在重点工序和检测时采用自动化和半自动化来完成内燃机的装配，多数采用手工记录装配过程重要参数，不仅效率低、受人为因素的干扰多、容易产生错误、产品质量难以保证、一致性差、产品不合格率和生产线停台经常发生等，而且使产品质量难以追溯、不便于管理。

国外模块化装配方式，减少了零部件数量，提升了产品质量，另外一个好处在于简化装配线作业内容，控制装配线作业的工作量，获得稳定的生产节拍，有利于装配线产能的最大限度发挥。 装配的布局可以缩短零部件对总装配线物料需求的响应时间，以保证快速生产的节拍及产品品种的快速切换。国外采用自动

化装配，装配线配备机器人、自动拧紧系统、自动涂胶系统、自动实时在线检测系统，基本上实现装配线无人操作，自动在线实时检测。

2. 装备保证差距

国内发动机装配线正由刚性装配线向柔性装配线方向发展，柔性装配线的特点是装配节拍可以在一定的范围内自由调整，可以实现多品种混流生产并适应生产纲领的变化。又由于在装配作业时装配对象和装配操作人员保持相对静止状态，对保证装配的高质量及采用专门的装配设备提供了方便条件，便于实现装配的自动化。

一般从美国和日本引进的非同步装配线为摩擦式机动辊道式、非摩擦式机动辊道式、悬挂装配式，从德国引进的非同步装配线多为纵置单滚杠式。目前国内用于发动机装配非同步装配线主要型式有纵置单滚杠式、摩擦式机动辊道式、非摩擦机动辊道式、双链滚轮式和鳞板式等。纵置单滚杠式、空中悬挂非同步装配线均为引进国外产品，该类型装配线适应柔性化、自动化装配的需求，定位精度高，可靠性好。

国外组装线台架与配料车均采用模块化设计，即组装线由若干个相同的模块和配料台车组成。 这大大降低了设计时间及成本，也使制造成本大大降低，同时这种模块化设计使组装线更能适应市场的变化。

3. 信息的孤岛化

国内内燃机装配环节的质量控制多以人工调度为主，任务下达和信息反馈不及时；而质量控制仍然以纸面质量卡片为主，不利于质量的精益化控制和质量信息的统计分析和预测。多种信息化系统汇聚形成孤岛，在装配制造环节，PDM/CAD 系统产生的 CAD 模型、CAPP 系统产生的工艺 BOM、ERP 系统管理的 MBOM 等数字化信息在装配现场汇集，而这些系统间缺乏清晰的数据接口和统一的管理发放平台，造成数据版本管理混乱，产品的技术状态维护困难等问题。

国外为满足美国及欧盟召回法规规定，装配线上采用了完善的计算机数据采集系统和信息管理软件，建立每台发动机终生质量信息档案。点击发动机的终生质量信息档案可以清楚地看到发动机的零件清单、零件的供应商、每次质量改进零件状态、发动机维修图、工序操作者代码、装配线工位测量记录以及售后维修记录等，全部信息都集中在该公司的 ERP 系统上。

4.6 政策与法规

在内燃机领域，近几十年来，新技术、新材料、新工艺的研发和应用，基本都是围绕节能减排的目的。通过排放法规的实施，推动了内燃机制造材料和工艺、燃油喷射系统、后处理装置技术的飞速发展。世界发动机排放法规以美国、欧洲、日本为代表先后制定了其内燃机排放法规，并形成了三大排放体系，其他国家基本直接引用或修改采用欧美的标准体系。

4.6.1 欧洲

1. 重型车用柴油机（含 NG/LPG）

欧盟自 2014 年 1 月 1 日开始执行第Ⅵ阶段排放标准，指令为 2009 年 6 月 18 日发布的 595/2009/EC 和 2011 年 5 月 25 日发布的 582/2011/EC，等同采用了欧洲经济委员会的 ECE R49.06 的要求。在欧Ⅵ排放标准中，各种污染物排放限值进一步加严，且增加了颗粒物排放数量的要求。欧Ⅵ排放标准限值要求见表 4-1。

表 4-1 欧Ⅵ排放标准限值要求

	CO/[mg/(kW·h)]	THC/[mg/(kW·h)]	NMHC/[mg/(kW·h)]	CH_4/[mg/(kW·h)]	NO_X/[mg/(kW·h)]	NH_3/ppm	PM 质量/[mg/(kW·h)]	PM 数量/(#/kW)
WHSC（CI（1））	1 500	130			400	10	10	8.0×10^{11}
WHTC（CI（1））	4 000	160			460	10	10	6.0×10^{11}
WHTC（PI（2））	4 000		160	500	460	10	10	

（1）CI= 压燃式发动机
（2）PI= 点燃式发动机

2. 非道路移动机械用柴油机

欧洲自 2012 年 12 月 31 日开始实施 97/68/EC 的修订指令 2010/26/EU，非道路移动机械用柴油机Ⅳ阶段。控制范围为非道路移动机械用额定净功率在 56 ～ 560kW 之间的柴油机。试验根据发动机类型的不同分别采用 ISO 8178 中 C_1 和 D_2 循环（即稳态的八工况和五工况循环）和 NRTC 循环，如表 4-2 所示。

表 4-2　非道路排放标准限值要求

分类	净功率 /kW	CO/ [g/（kW·h）]	HC/ [g/（kW·h）]	NO_X/ [g/（kW·h）]	PM/ [g/（kW·h）]
Q	130 ～ 560	3.5	0.19	0.4	0.025
R	56 ～ 130	5.0	0.19	0.4	0.025

3. 内河船用柴油机

根据排量的不同规定了不同的排放限值，采用 97/68/EC 的修订指令 2004/26/EC，根据类型不同，确定了不同的实施时间，见表 4-3。

表 4-3　内河船机类型划分及限值要求

分类：排量 / 净功率 SV/P	CO/ [g/（kW·h）]	HC+NO_X/ [g/（kW·h）]	PT/ [g/（kW·h）]	实施时间
V1:1 SV ＜ 0.9 P ≥ 37kW	5.0	7.5	0.40	2006.01.01
V1:2 0.9 ≤ SV ＜ 1.2	5.0	7.2	0.30	2005.07.01
V1:3 1.2 ≤ SV ＜ 2.5	5.0	7.2	0.20	2005.07.01
V1:4 2.5 ≤ SV ＜ 5	5.0	7.2	0.20	2007.01.01
V2:1 5 ≤ SV ＜ 15	5.0	7.8	0.27	2008.01.01
V2:2 15 ≤ SV ＜ 20	5.0	8.7	0.50	2008.01.01
V2:3 15 ≤ SV ＜ 20	5.0	9.8	0.50	2008.01.01
V2:4 20 ≤ SV ＜ 25	5.0	9.8	0.50	2008.01.01
V2:5 25 ≤ SV ＜ 30	5.0	11.0	0.50	2008.01.01

4. 铁路机车、轨道车辆用柴油机

按照功率段划分不同的排放限值，详细要求见表 4-4。

表 4-4　轨道车辆用柴油机 Ⅲ A 阶段排放限值

分类：排量 / 净功率 SV/P	CO/ [g/（kW·h）]	HC+NO_X/ [g/（kW·h）]	PT/ [g/（kW·h）]	实施时间
V1:1 SV ＜ 0.9 P ≥ 37kW	5.0	7.5	0.40	2006.01.01
V1:2 0.9 ≤ SV ＜ 1.2	5.0	7.2	0.30	2005.07.01
V1:3 1.2 ≤ SV ＜ 2.5	5.0	7.2	0.20	2005.07.01
V1:4 2.5 ≤ SV ＜ 5	5.0	7.2	0.20	2007.01.01
V2:1 5 ≤ SV ＜ 15	5.0	7.8	0.27	2008.01.01

（续）

分类：排量 / 净功率 SV/P	CO/ [g/（kW·h）]	$HC+NO_X$/ [g/（kW·h）]	PT/ [g/（kW·h）]	实施时间
V2:2 15 ≤ SV < 20	5.0	8.7	0.50	2008.01.01
V2:3 15 ≤ SV < 20	5.0	9.8	0.50	2008.01.01
V2:4 20 ≤ SV < 25	5.0	9.8	0.50	2008.01.01
V2:5 25 ≤ SV < 30	5.0	11.0	0.50	2008.01.01

5. 轻型汽车

欧洲从第Ⅴ阶段开始，标准分为5a、5b、5b+，Ⅵ阶段标准分为6a、6b、6c，根据载重量的不同，规定了不同的限值要求。欧洲目前轻型车排放实施欧盟6b阶段，排放限值及实施时间见表4-5、表4-6。

表4-5　轻型车污染物排放限值要求（点燃式）

污染物 /（mg/km）	皮卡、轻型车N1类				轻型车N1类				轻型车N1和N2类			
	Euro 5a	Euro 5b/b+	Euro 6b	Euro 6c	Euro 5a	Euro 5b/b+	Euro 6b	Euro 6c	Euro 5a	Euro 5b/b+	Euro 6b	Euro 6c
THC	100	100	100	100	130	130	130	130	160	160	160	160
NMHC	68	68	68	68	90	90	90	90	108	108	108	108
NO_X	60	60	60	60	75	75	75	75	82	82	82	82
CO	1 000	1 000	1 000	1 000	1 810	1 810	1 810	1 810	2 270	2 270	2 270	2 270
PM	5.0	4.5	4.5	4.5	5.0	4.5	4.5	4.5	5.0	4.5	4.5	4.5
PN	–	–	6.0×10^{11}	6.0×10^{11}	–	–	6.0×10^{11}	6.0×10^{11}	–	–	6.0×10^{11}	6.0×10^{11}
实施时间	2014年9月1日				2015年9月1日				2015年9月1日			

表4-6　轻型车污染物排放限值要求（压燃式）

污染物 /（mg/km）	皮卡、轻型车N1类			轻型车N1类			轻型车N1和N2类		
	Euro 5a	Euro 5b/b+	Euro 6b/6c	Euro 5a	Euro 5b/b+	Euro 6b/6c	Euro 5a	Euro 5b/b+	Euro 6b/6c
NO_X	180	180	80	235	235	105	280	280	125
$HC+NO_X$	230	230	170	295	295	195	350	350	215
CO	500	500	500	630	630	630	740	740	740
PM	5.0	4.5	4.5	5.0	5.0	4.5	5.0	5.0	4.5
PN	–	6.0×10^{11}	6.0×10^{11}	–	6.0×10^{11}	6.0×10^{11}	–	6.0×10^{11}	6.0×10^{11}
实施时间	2015年9月1日			2015年9月1日			2015年9月1日		

4.6.2 美国

美国是世界上最早拥有汽车排放法规的国家，1974 年就提出了各种污染物的排放限值。从 2007 年起引入整车的 NTE 排放测试。

1. 重型车用柴油机（EPA CFR PART 86）

2014 年美国车用柴油机采用新的排放法规即 EPA CFR40 PART 1036 和 EPA CFR40 PART 1037，其中 EPA CFR40 PART 1036 标准是在发动机上进行试验，EPA CFR40 PART 1037 要求在整车上进行试验。详细标准要求见表 4-7。

表 4-7 EPA CFR40 PART 1036 限值要求

标准名称	实施日期（年）	排放限值 /（g/hp·h）					
		CO	HC	HC_4	NO_X	N_2O	PM
EPA CFR40 PART 1036	2014—2016		0.14	0.1	0.2	0.1	0.01

注：1hp=0.745kW。

2. 非道路用柴油机

美国国家环保局（EPA）从 1990 年开始着手研究和限制非道路用柴油机的尾气排放。1998 年 8 月 27 日，EPA 签署了 40 CFR PART89 法规，规定了非道路用柴油机第一、二、三阶段排放标准。

40 CFR PART 1039 是美国非道路移动机械用柴油机第四阶段的排放标准（包含 $P < 37$ kW 的船用发动机），该标准从 2008 年分功率段逐步开始实施，从 2008 年到 2014 年是本标准的过渡期，过渡期内有相应限值要求，2014 年以后，正式实施第四阶段限值要求。Tier1-tier3 过渡时期排放限值要求见表 4-8。

美国 Tier 4 从 2008 年开始实施，2008 年到 2014 年为标准的过渡时期，2014 年后正式实施 Tier4，在过渡期相比 Tier 3 只是加严了 NO_X 的排放限值，过渡期结束后正式的 Tier4 又加严了颗粒物的限值要求，这样既给企业留出了足够的时间进行产品升级也避免了直接升到 Tier4 造成的产品价格激增。Tier4 发动机排放限值见表 4-9。

表 4-8　Tier1- Tier3 过渡时期排放限值

功率 /kW	实施日期	排放限值 /[g/（kW·h）]				
		CO	NMHC	NMHC+NO_X	NO_X	PM
$19 \leqslant P < 37$	2008—2012	5.5	/	7.5	/	0.30
$37 \leqslant P < 56$	2008—2012	5.0	/	4.7	/	0.30
$56 \leqslant P < 130$	2012—2014	5.0	0.19	/	3.4	0.02
$130 \leqslant P \leqslant 560$	2011—2013	3.5	0.19	/	2.0	0.02
$P > 560$	2011—2014	3.5	0.40	/	3.5（0.67[①]）	0.10

注：大于 900kW 的可移动式发电机组用柴油机采用该限值。

表 4-9　Tier4 发动机排放限值

功率 /kW	范围	排放限值 /[g/（kW·h）]				
		CO	NMHC	NMHC+NO_X	NO_X	PM
$P < 19$	全部	6.6	/	7.5	/	0.40
$19 \leqslant P < 56$	全部	5.0	/	4.7	/	0.03
$56 \leqslant P < 130$	全部	5.0	0.19	/	0.40	0.02
$130 \leqslant P \leqslant 560$	全部	3.5	0.19	/	0.40	0.02
$P > 560$	发电机组	3.5	0.19	/	0.67	0.03
	非发电机组	3.5	0.19	/	3.50	0.04

3. 美国船用发动机

功率 $P \geqslant 37$kW 的 1 类和 2 类压燃式船机依据指令 40 CFR PART 1042 进行污染控制。适用于所有在美国海岸线 200 海里范围内（专属经济区）航行的船舶上装用的额定功率大于 37kW 的压燃式船机，适用于 1 类、2 类和 3 类船机的排放要求。

标准中包含了 1 类船机的排放限值要求，对于商用船舶装用的 C1 类船机（标准功率密度（< 35 kW /L）和高功率密度（> 35 kW /L））和娱乐用船舶装用的 C1 类船机的 Tier 3 排放限值稍有差异。

1）对商用船舶装用的 C1 类船机（标准功率密度）Tier3 排放要求，见表 4-10。

表 4-10　C1 类柴油船机（标准功率密度）Tier3 法规限值

功率 /kW	排量 /L	型年	HC+NO_X/ [g/（kW·h）]	PM/ [g/（kW·h）]	CO/ [g/（kW·h）]
＜ 19	＜ 0.9	2009	7.5	0.40	5.0
19 ～ 75	＜ 0.9	2009	7.5	0.30	5.0
		2014	4.7	0.30	5.0
75 ～ 3 700	＜ 0.9	2012	5.4	0.14	5.0
	0.9 ＜ *Vh* ＜ 1.2	2013	5.4	0.12	5.0
	1.2 ＜ *Vh* ＜ 2.5	2014	5.6	0.11	5.0
	2.5 ＜ *Vh* ＜ 3.5	2013	5.6	0.11	5.0
	3.5 ＜ *Vh* ＜ 7	2012	5.8	0.11	5.0

注：*Vh*—气缸工作容积（L）。

2）对商用船舶装用的 C1 类船机（高功率密度，＞ 35kW/L）和娱乐用船舶装用的 C1 类船机 Tier3 排放要求，见表 4-11。

表 4-11　C1 类柴油船机（高功率密度）Tier 3 法规限值

功率 /kW	排量 /L	型年	HC+NO_X/ [g/（kW·h）]	PM/ [g/（kW·h）]	CO/ [g/（kW·h）]
＜ 19	＜ 0.9	2009	7.5	0.40	5.0
19 ～ 75	＜ 0.9	2009	7.5	0.30	5.0
		2014	4.7	0.30	5.0
75 ～ 3 700	＜ 0.9	2012	5.8	0.15	5.0
	0.9 ＜ *Vh* ＜ 1.2	2013	5.8	0.14	5.0
	1.2 ＜ *Vh* ＜ 2.5	2014	5.8	0.12	5.0
	2.5 ＜ *Vh* ＜ 3.5	2013	5.8	0.12	5.0
	3.5 ＜ *Vh* ＜ 7	2012	5.8	0.11	5.0

3）对 C2 类柴油船机 Tier3 排放要求，见表 4-12。

表 4-12　C2 类柴油船机 Tier3 法规限值

功率 /kW	排量 /L	型年	HC+NO_X/ [g/（kW·h）]	PM/ [g/（kW·h）]
＜ 3 700	7 ＜ *Vh* ＜ 15	2013	6.2	0.14
	15 ＜ *Vh* ＜ 20	2014	7.0	0.27
	20 ＜ *Vh* ＜ 25	2014	9.8	0.27
	25 ＜ *Vh* ＜ 30	2014	11.0	0.27

4）对 C1 和 C2 类柴油船机 Tier4 排放要求，见表 4-13。

表 4-13　C1 和 C2 类柴油船机 Tier4 法规限值

功率 /kW	型年	HC/ [g/（kW·h）]	NOX / [g/（kW·h）]	PM/ [g/（kW·h）]
≥ 3 700	2014	0.19	1.8	0.12
	2016	0.19	1.8	0.06
2 000 ≤ *P* ＜ 3 700	2014	0.19	1.8	0.04
1 400 ≤ *P* ＜ 2 000	2016	0.19	1.8	0.04
600 ≤ *P* ＜ 1 400	2017	0.19	1.8	0.04

4. 轻型汽车

1991 年美国开始实施轻型车排放标准， Tier1 过渡阶段为 1994—1997 年，在 Tier2 中增加了轻型车的要求，其过渡阶段为 2004—2007 年。且标准规定了车辆有效寿命期内的污染物排放限值要求。详细要求见表 4-14。

表 4-14　美国轻型车各阶段排气污染物排放限值要求

标准	排放限值（50 000mile）					排放限值（120 000mile）				
	NO_X	NMOG	CO	PM	HCHO	NO_X	NMOG	CO	PM	HCHO
Bin1	–	–	–	–	–	0.00	0.00	0.0	0.00	0.000
Bin2	–	–	–	–	–	0.02	0.02	2.1	0.01	0.004
Bin3	–	–	–	–	–	0.03	0.055	2.1	0.01	0.011
Bin4	–	–	–	–	–	0.04	0.07	2.1	0.01	0.011
Bin5	0.05	0.075	3.4	–	0.015	0.07	0.09	4.2	0.01	0.018
Bin6	0.08	0.075	3.4	–	0.015	0.40	0.09	4.2	0.01	0.018
Bin7	0.11	0.075	3.4	–	0.015	0.15	0.09	4.2	0.02	0.018

（续）

标准	排放限值（50 000mile）					排放限值（120 000mile）				
	NO_X	NMOG	CO	PM	HCHO	NO_X	NMOG	CO	PM	HCHO
Bin8	0.14	0.100/0.125	3.4	–	0.015	0.20	0.125/0.156	4.2	0.02	0.018
Bin9	0.20	0.075/0.140	3.4	–	0.015	0.30	0.090/0.180	4.2	0.06	0.018
Bin10	0.40	0.125/0.160	3.4/4.4	–	0.015/0.018	0.60	0.156/0.230	4.2/6.4	0.08	0.018/0.027
Bin11	0.60	0.195	5.0	–	0.022	0.90	0.28	7.3	0.12	0.032

注：1mile=1 609.344m。

4.6.3 日本

日本也是世界上较早实施发动机排气污染物法规的国家之一。根据尺寸、重量、乘员数量和用途等条件进行类别划分，不同的类别有不一样的法规和限值。日本汽车的分类见表 4-15。

表 4-15 日本车辆类别划分

车辆区分	定义
普通汽车	小型汽车、轻型汽车、大型特殊汽车及小型特殊汽车以外的汽车
小型汽车	长≤ 3.4m、宽≤ 1.7m、高≤ 2.0 m 的四轮（含）以上的车辆（柴油车 CNG 以外的内燃机作为原动机时，排气量在 2L 以下）
轻型车	长≤ 3.4m、宽≤ 1.7m、高≤ 2.0 m 的四轮（含）以上的车辆（柴油车 CNG 以外的内燃机作为原动机时，排气量在 0.66L 以下）
乘用车	乘客定员≤ 10 人的普通汽车（乘用），摩托车以外的车辆
轻量车	车辆总重≤ 1.7t 的普通汽车、小型汽车 ；摩托以外的车辆；乘用车以外的车辆
中量车	1.7t ＜车辆总重≤ 3.5t 的普通汽车、小型汽车 ；摩托以外的车辆；乘用车以外的车辆
重量车	车辆总重＞ 3.5t 的普通汽车、小型汽车 ；摩托以外的车辆；乘用车以外的车辆

1. 重型车用柴油机

重型车用发动机自 2009 年实施新长期计划，排气污染物限值见表 4-16。

表 4-16　日本重型车用发动机排气污染物排放限值要求

卡车和公交车 GVW ＞ 3.5t

g/（kW·h）	PM		NO_X		NMHC		CO	
	标准要求	其他	标准要求	其他	标准要求	其他	标准要求	其他
柴油	0.010	0.013	0.7	0.9	0.17	0.23	2.22	2.95
汽油 / 液化石油气	0.010	0.013	0.7	0.9	0.23	0.31	16.0	21.3
备注	车辆总重＞ 7.5t 的车辆，2016 年 NO_X 需要降低到 0.4g； 对于牵引车辆，2017 年 NO_X 需要降低到 0.4g							

2. 非道路用柴油机

日本非道路用柴油机发布的 2011 年排放标准，排气污染物限值见表 4-17。

表 4-17　日本非道路用柴油机排气污染物排放限值要求

净功率 /kW	NO_X		NMHC		CO		PM		烟度	日期	
	g/（kW·h）										
	平均值	最大值	平均值	最大值	平均值	最大值	平均值	最大值	%	新生产车	在用车
19 ～ 37	6.00	7.98	1.00	1.33	5.00	6.50	0.40	0.53	40	07OCT01	
	4.00	5.30	0.70	0.90	5.00	6.50	0.03	0.04	25	01OCT13	01SEP15
37 ～ 56	4.00	5.32	0.70	0.93	5.00	6.50	0.30	0.40	35	08OCT01	
	4.00	5.32	0.70	0.90	5.00	6.50	0.025	0.033	25	01OCT13	01NOV14
56 ～ 75	4.00	5.32	0.70	0.93	5.00	6.50	0.25	0.33	30	08OCT01	
	3.30	4.40	0.19	0.25	5.00	6.50	0.02	0.03	25	01OCT12	01APR14
75 ～ 130	3.60	4.79	0.40	0.53	5.00	6.50	0.20	0.27	25	07OCT01	
	3.30	4.40	0.19	0.25	5.00	6.50	0.02	0.03	25	01OCT12	01NOV13
130 ～ 560	3.60	4.79	0.40	0.53	3.50	4.55	0.17	0.23	25	06OCT01	
	2.00	2.70	0.19	0.25	3.50	4.60	0.02	0.03	25	01OCT11	01APR13

3. 轻型汽车

日本对汽油机改为气体发动机和 LPG 发动机的详细要求见表 4-18、表 4-19。

表 4-18　气体发动机和 LPG 发动机的限值要求

车型	测试工况	单位	CO	NMHC	NO_X	PM	年份
乘用车	10 ～ 15 工况	g/km	0.67	0.08	0.08	–	2000
	11 工况	g/test	19.0	2.20	1.40	–	
迷你商务车	10 ～ 15 工况	g/km	3.30	0.13	0.13	–	2002
	11 工况	g/test	38.0	3.50	2.20	–	
轻型商务车 GVW ＞ 1.7t	10 ～ 15 工况	g/km	0.67	0.08	0.08	–	2000
	11 工况	g/test	19.0	2.20	1.40	–	
中型商务车 1.7t ＜ GVW ＜ 3.5t	10 ～ 15 工况	g/km	2.10	0.08	0.13	–	2001
	11 工况	g/test	24.0	2.20	1.60	–	
乘用车	组合工况	g/km	1.15	0.05	0.05	–	2005
迷你商务车			4.02	0.05	0.05	–	2007
轻型商务车 GVW ＞ 1.7t			1.15	0.05	0.05	–	2005
中型商务车 1.7t ＜ GVW ＜ 3.5t			2.55	0.05	0.05	–	2005
乘用车	组合工况	g/km	1.15	0.05	0.05	0.05	2009
迷你商务车			4.02	0.05	0.05	0.05	2009
轻型商务车 GVW ＞ 1.7t			1.15	0.05	0.05	0.05	2009
中型商务车 1.7t ＜ GVW ＜ 3.5t			2.55	0.05	0.07	0.07	2009

表 4-19　日本轻型车用柴油机排气污染物要求

车型	测试工况	单位	CO	NMHC	NO_X	PM	年份
乘用车＜ 1 265kg	10 ～ 15 工况	g/km	0.63	0.12	0.28	0.052	2002
乘用车＞ 1 265kg			0.63	0.12	0.30	0.056	2002
轻型商务车 GVW ＞ 1.7t			0.63	0.12	0.28	0.052	2002
中型商务车 1.7t ＜ GVW ＜ 3.5t			0.63	0.12	0.49	0.06	2003
乘用车	组合工况	g/km	0.63	0.024	0.14	0.012	2005
迷你商务车			0.63	0.024	0.15	0.014	2005
轻型商务车 GVW ＞ 1.7t			0.63	0.024	0.14	0.013	2005
中型商务车 1.7t ＜ GVW ＜ 3.5t			0.63	0.024	0.25	0.015	2005
乘用车	组合工况	g/km	0.63	0.024	0.08	0.005	2009
轻型商务车 GVW ＞ 1.7t			0.63	0.024	0.08	0.005	2009
中型商务车 1.7t ＜ GVW ＜ 3.5t			0.63	0.024	0.15	0.007	2009

4.6.4 其他国家或地区

1. 车用柴油机

全球其他国家或地区基本都是采用欧美的排放标准体系，与欧美相比较，只是实施时间落后于欧美。

北美：加拿大、墨西哥采用美标，实施时间落后于美国。

韩国、印度、俄罗斯（海关联盟包括俄罗斯、白俄罗斯、哈萨克斯坦）、中东、巴西、中国香港、新加坡、越南等国家或地区主要参考实行欧标或欧洲经济委员会的 R24、R49 标准。

印度与欧标的主要区别：印度也是采用型年制度。根据每年销售数量的不同，每年或每两年需要对产品进行试验，重新认证。

俄罗斯与欧标主要区别：增加了冷启动和噪声试验的要求。冷启动要求：无电控系统在低于 -10℃进行实验，电控系统要求低于 -30℃进行实验。

全球其他国家或地区车用柴油机排放法规见表 4-20。

表 4-20 全球其他国家或地区车用柴油机排放法规

国家或地区	采用标准的情况
阿根廷	采用 ECE4 9，与 2014 年实施第Ⅴ阶段
澳大利亚	2010 年 1 月 1 日开始欧Ⅴ，2016 年 1 月 1 日开始欧Ⅵ
巴西	2012 年 4 月 1 日实施欧Ⅴ
中国香港	2012 年 7 月 1 日实施欧Ⅴ
俄罗斯	2014 年 1 月 1 日实施欧Ⅴ
印度	2010 年实施欧Ⅲ，15 个重点区实施欧Ⅳ

2. 非道路用发动机

全球其他国家或地区非道路用发动机基本沿用欧美标准体系，详细排放法规见表 4-21。

表 4-21 全球其他国家或地区非道路用发动机排放法规

国家或地区	采用标准的情况
加拿大	同步采用美国 Tier4
巴西	2015 年 1 月 1 日实施欧Ⅲ A
中国香港	2012 年 7 月 1 日实施欧Ⅴ
俄罗斯	2013 年 1 月 1 日实施欧Ⅲ A
韩国	2015 年 1 月实施美国 Tier4

3. 轻型汽车

轻型车及轻型车用发动机排放法规，全球其他国家或地区基本沿用欧美标准体系，详细排放法规见表 4-22。

表 4-22　全球其他国家或地区轻型车及轻型车用发动机排放法规

国家或地区	采用标准的情况
阿根廷	2015 年 1 月实施欧Ⅴ
俄罗斯	2012 年 1 月 1 日实施欧Ⅳ
印度	2010 年 10 月实施欧Ⅲ

4.6.5　中国

我国机动车排气污染物排放标准一直是修改采用欧洲的体系。

1. 重型车用柴油机（含 NG/LPG）

2001 年 4 月 16 日，我国参考欧盟指令 91/542/EEC 和欧洲经济委员会 ECE R49/02 法规发布了我国第一部车用柴油机排放法规即 GB 17691—2001《车用压燃式发动机排气污染物排放限值及测量方法（中国Ⅰ、Ⅱ阶段）》，规定了第一、二阶段的排放标准。我们国家后续的车用、非道路用柴油机污染物排放法规都基本采用了欧盟的指令体系。2005 年 5 月 30 日发布了车用柴油机第三、四、五阶段的排放标准即 GB 17691—2005《车用压燃式发动机排气污染物排放限值及测量方法（中国Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ阶段）》。从第三阶段开始新的试验循环 ESC、ELR、ETC 代替了第一、二阶段的稳态十三工况循环。2008 年 6 月 24 日，又发布了 HJ 437—2008、HJ 438—2008、HJ 439—2008、三个标准作为对 GB 17691—2005 的有效补充。各阶段详细要求见表 4-23。

表 4-23　车用柴油机污染物排放限值要求

标准名称	实施阶段	实施日期	一氧化碳（CO）	碳氢化合物（HC）	氮氧化物（NO_X）	颗粒物（PM）	
						≤ 85kW (1)	> 85kW (1)
GB 17691—2001	Ⅰ	2000.9.1	4.5	1.1	8.0	0.61	0.36
	Ⅱ	2003.9.1	4.0	1.1	7.0	0.152	0.152
	（1）指发动机功率。						

（续）

标准名称	实施阶段	实施日期	一氧化碳（CO）	碳氢化合物（HC）	氮氧化物（NO_X）	颗粒物（PM）	
						≤ 85kW (1)	> 85kW (1)
GB 17691—2005及其修订： HJ 437—2008 HJ 438—2008 HJ 439—2008	实施阶段	实施日期	CO	HC	NO_X	PM	烟度
	Ⅲ	2007.1.1	2.1	0.66	5.0	0.10（0.13 (1)）	0.8
	Ⅳ	2010.1.1	1.5	0.46	3.5	0.02	0.5
	Ⅴ	2012.1.1	1.5	0.46	2.0	0.02	0.5
	EEV		1.5	0.25	2.0	0.02	0.15
	（1）对每缸排量低于 0.75dm^3 及额定功率转速超过 3 000r/min 的发动机，上述为 ESC 循环限值要求。						
	实施阶段	实施日期	CO	NMHC (1)	CH_4	NO_X	PM (2)
	Ⅲ	2007.1.1	5.45	0.78	1.6	5.0	0.16（0.21 (3)）
	Ⅳ	2010.1.1	4.0	0.55	1.1	3.5	0.03
	Ⅴ	2012.1.1	4.0	0.55	1.1	2.0	0.03
	EEV		3.0	0.40	0.65	2.0	0.02
	（1） 仅对 NG 发动机。 （2） 不适用于第Ⅲ、Ⅳ和Ⅴ阶段的燃气发动机。 （3） 对每缸排量低于 0.75dm^3 及额定功率转速超过 3 000r/min 的发动机。						

2. 非道路用柴油机

2007 年 4 月 3 日，我国发布了非道路移动机械用柴油机排气污染物的排放标准即 GB 20891—2007《 非道路移动机械用柴油机排气污染物排放限值及测量方法（第一、二阶段） 》，标准修改采用欧盟指令 97/68/EC。2014 年 5 月 6 日又发布 GB 20891—2014《非道路移动机械用柴油机排气污染物排放限值及测量方法（第三、四阶段） 》，自 2014 年 10 月 1 日始实施第三阶段。限值要求见表 4-24。

表 4-24　非道路用柴油机排气污染物排放限值要求（第三、四阶段）

阶段	实施时间	额定净功率（P_{max}）/kW	CO/[g/（kW·h）]	HC/[g/（kW·h）]	NO_X/[g/（kW·h）]	HC+NO_X/[g/（kW·h）]	PM/[g/（kW·h）]
第三阶段	2014.10.1	$P_{max}>560$	3.5	—	—	6.4	0.20
		$130\leqslant P_{max}\leqslant 560$	3.5	—	—	4.0	0.20
		$75\leqslant P_{max}<130$	5.0	—	—	4.0	0.30
		$37\leqslant P_{max}<75$	5.0	—	—	4.7	0.40
		$P_{max}<37$	5.5	—	—	7.5	0.60
第四阶段	鼓励有条件的地区提前实施	$P_{max}>560$	3.5	0.40	3.5，0.67 (1)	—	0.10
		$130\leqslant P_{max}\leqslant 560$	3.5	0.19	2.0	—	0.025
		$75\leqslant P_{max}<130$	5.0	0.19	3.3	—	0.025
		$56\leqslant P_{max}<75$	5.0	0.19	3.3	—	0.025
		$37\leqslant P_{max}<56$	5.0	—	—	4.7	0.025
		$P_{max}<37$	5.5	—	—	7.5	0.60

（1）适用于可移动式发电机组用 $P_{max}>900$kW 的柴油机。

3. 轻型汽车

2005 年 4 月 15 日发布 GB 18352.3—2005《轻型汽车污染物排放限值及测量方法（中国Ⅲ、Ⅳ阶段）》，自 2010 年 1 月 1 日开始实施第四阶段标准。限值及要求见表 4-25。

表 4-25　轻型汽车国Ⅳ阶段限值及要求

			基准质量（*RM*）/kg	限值/（g/km）								
				CO		HC		NO_X		HC+NO_X		PM
				L1		L2		L3		L2+L3		L4
阶段	类别	级别		汽油	柴油	汽油	柴油	汽油	柴油	汽油	柴油	柴油
第四阶段	第一类车	一	全部	1.00	0.50	0.10	–	0.08	0.25	–	0.30	0.25
	第二类车	Ⅰ	$RM\leqslant 1\,305$	1.00	0.50	0.10	–	0.08	0.25	–	0.30	0.25
		Ⅱ	$1\,305<RM\leqslant 1\,760$	1.81	0.63	0.13	–	0.10	0.33	–	0.39	0.40
		Ⅲ	$1\,760<RM$	2.27	0.74	0.16	–	0.11	0.39	–	0.46	0.46

2013 年 9 月 17 日发布 GB18352.5—2013《轻型汽车污染物排放限值及测量方法（中国第五阶段）》《轻型汽车污染物排放限值及测量方法（中国第五阶段）》自 2018 年 1 月 1 日实施第五阶段标准。限值及要求见表 4-26。

表 4-26　轻型汽车国Ⅴ阶段限值及要求

		基准质量（*RM*）/kg	限值 /（g/km）													
			CO		T HC		NMHC		NO_X		THC+NO_X		PM		PN	
			L1		L2		L3		L4		L2+L4		L5		L6/（个 /km）	
类别	级别		PI	CI	PI	CI	PI	CI	PI	CI	PI	CI	PI (1)	CI	PI	CI
第一类车	一	全部	1.00	0.50	0.100	–	0.068	–	0.060	0.180	–	0.230	0.0045	0.0045	–	6.0×10^{11}
第二类车	Ⅰ	*RM* ≤ 1 305	1.00	0.50	0.100	–	0.068	–	0.060	0.180	–	0.230	0.0045	0.0045	–	6.0×10^{11}
	Ⅱ	1 305 < *RM* ≤ 1 760	1.81	0.63	0.130	–	0.090	–	0.075	0.235	–	0.295	0.0045	0.0045	–	6.0×10^{11}
	Ⅲ	1 760 < *RM*	2.27	0.74	0.160	–	0.108	–	0.0842	0.280	–	0.350	0.0045	0.0045	–	6.0×10^{11}

注：PI– 点燃式 CI– 压燃式。

（1）仅适用于装缸内直喷发动机的汽车。

第 5 章

目 标

内燃机作为国家战略性新兴产业，是节能减排的主导产业，承担着节能减排的重要使命。在新时期、新常态，内燃机行业应该全面贯彻党的十八届五中全会精神，以创新、协同、绿色、开放、共享的发展理念，进一步夯实发展基础，提升核心竞争力，加强与相关产业的互动，支撑配套主机发展。经过几年的建设，重点突破高效清洁内燃机的关键技术，整体推进我国内燃机及相关产业的节能减排工作，力争使内燃机产业成为国民经济和社会发展的重要推动力量。

5.1 指导思想

全面贯彻党的十八届五中全会精神，坚持以自主创新、节能减排为主题，提质增效为中心，以加快现代信息技术与生产制造和产品应用深度融合为主线，以推进内燃机的智能制造为主攻方向，满足我国交通运输基础设施建设、农业现代化、国防现代化建设用动力机械的需求为目标，以企业为主体，以市场为导向，以科技为支撑，以政策为保障，强化内燃机工业基础创新能力建设，推进共性基础技术平台建设，促进产业转型升级和相关行业的协同发展。完善全行业多层次多类型人才的培养体系，培育自主品牌，提高内燃机产品的国际竞争力，实现内燃机制造强国的目标。

基本方针是：全面落实国务院《关于印发〈中国制造 2025〉的通知》（国发〔2015〕28 号文件和《国务院办公厅关于加强内燃机工业节能减排的意见》（国办发〔2013〕12 号））提出的总体目标和任务要求。坚持创新、协同、绿色、开放、共享的发展理念，始终把创新驱动摆在内燃机行业发展的核心位置，完善有利于创新的制度环境，突破节能减排先进共性基础技术和关键零部件产业化应用。促进制造业数字化、网络化、智能化，坚持走创新驱动的发展道路。坚持把质量作为内燃机产品的生命线，强化企业质量主体责任。建设法规标准体系、质量监管体系，全面推进行业自律，营造诚信经营的市场环境。坚持绿色发展，从推广内燃机可持续发展为重要着力点，加大节能环保技术、工艺、装备的推广应用，全面推行清洁生产。开展内燃机再制造，构建绿色制造体系。坚持结构调整，优化关键环节，大力发展先进智能制造，推动生产型制造向服务型制造转变。以产品技术链为牵引，优化产业链建设和空间布局，培育一批具有核心竞争力的产业集群和企业群体，协同发展。坚持人才为本，建立健全科学合理的选人、用人、育

人机制，加大人才培养力度，加快培养科研、应用工程、产业化和生产制造以及配套应用等领域发展急需的专业技术人才、经营管理人才、技能人才，在关键技术领域培育一批领军人才。营造行业创业、万众创新的氛围，坚持把内燃机产品的配套及使用市场服务作为推动产业发展的有力保障，建设网络化服务保障体系，实现快速响应和高效运行。

5.2 发展战略及目标

5.2.1 发展战略

内燃机作为中间主要配套产品，在其发展进程中受用户需求强烈牵引。为了贯彻落实“中国制造 2025”提出的实现制造强国战略目标的三步走战略，内燃机产业发展将会重点抓好以下几方面工作。

“十三五”期间，继续巩固内燃机制造大国的地位，实现产品生产制造智能化，推动行业提升信息化水平，在核心技术、关键基础零部件、先进制造工艺和新材料应用上缩短与国际先进水平的差距，有效地提高产品质量和生产一致性。迈出中国内燃机工业发展战略的第一步。

提出基础科研专项，加大研发资金投入，开展节能减排前沿技术的基础研究，通过共性基础技术平台建设和组织实施，为自主创新产品开发奠定基础。进入中国内燃机工业发展战略的第二步。

协同配套整机产品的发展要求，在内燃机节能减排前沿技术领域取得重大突破，占领制高点。全行业整体竞争实力进入全球内燃机制造工业的第一阵营。建成全球领先的技术体系和产业体系。实现世界制造强国目标，综合实力进入世界制造强国前列。实现中国内燃机工业发展三步走发展战略。

5.2.2 发展目标

掌握核心制造技术和关键工艺技术，建设 8 ～ 10 个共性基础技术平台，推动内燃机节能减排先进技术研发和科技成果转化。全面实施智能化改造，完成绿色制造体系建设。

培育具有较强国际竞争力的跨国公司和产业集群，提升中国内燃机产业在全球产业分工和价值链中的地位。

加快内燃机再制造产业发展。推广替代燃料内燃机应用，实现内燃机燃料多元化。

全面贯彻执行国家机动车和内燃机排放法规，实施内燃机产品燃油消耗率公告制度，建立“领跑者”激励机制，实现节能环保型内燃机产品广泛应用。

加强自主研发能力的建设。打造一支具有国际视野的自主研发队伍，培养一批具有强大市场竞争力的领军人物。掌握内燃机核心技术研发能力，实现我国内燃机产业从大到强的转变。

5.3 关键技术重点发展方向

为了实施中国内燃机工业发展三步走发展战略，真正实现从内燃机制造大国向制造强国的嬗变，行业要以市场需求为牵引，全面对照和分析国内外同类产品的特点，找出与先进产品差距，本着‘有所为，有所不为’的方针，整合国内内燃机行业的资源，针对市场需求，结合产学研，重点抓好以下几方面的技术发展。

5.3.1 内燃机控制技术

内燃机为了满足不断严格的排放法规要求和面临节能的压力，电子控制已经成为必须采用的技术手段。目前我国车用高性能内燃机电控系统基本掌握在国外大公司的手里，技术产品大多来自德国博世、德尔福、西门子等公司。为了打破这种被动局面，内燃机产业需要加大整合国内的资源，重点突破内燃机控制领域的几项关键技术，加强政产学研以及国内企业间的合作。在政府有关部门、行业协会等协调领导下，创新出具有自主知识产权的控制技术，重点突破专用软件研发、软件平台自主标定两大核心技术，开展基于柴油机、汽油机节能环保创新技术要求的控制策略研究，包括全可变气门机构（VVA、VVL）、可变压缩比（VCR）、热管理、DPF、GPF 等先进技术的控制策略研究，研究出满足我国实际使用工况、满足整机及整车要求的控制策略，并可转化为可嵌入不同电控系统平台的专用控制软件，解决主机厂在先进零部件或系统应用时在控制策略方面长期依赖国外的局面，实现先进核心技术硬件、控制策略、控制软件同步发展。

深化电控标定技术的研究及应用，通过对电控系统进行系统的、深入的、细化的标定实现较大程度的低成本或无成本节能减排效果。开展虚拟标定、自动标定、标定数据处理、标定数据管理等先进的电控标定技术的研究工作，提高电控标定效率、标定精度及标定数据的鲁棒性，实现标定与产品开发的同步工程，掌握电控系统及软件技术，实现以主机厂定义系统功能、系统供应商提供通用化的基本功能、主机厂实现特征化的特殊功能、主机厂完成完整的电控系统标定的目标。

开展发动机电动化相关控制技术研究，包括 12V/48V BSG 技术、电动增压器技术、电动或离合水泵技术、电动机油泵技术、电动 VCT 技术等的控制策略及控制软件研究，逐步实现传统内燃机的机电驱动一体化，并籍此实现传统内燃机在节能、环保方面比纯电驱动更具优势。

建立内燃机工作过程控制平台，通过控制策略，实现整机与部件的“对话”，实现整机与配套底盘的“对话”，实现远程故障诊断。采用机电控制方法，实现对现代内燃机动力性、经济性、环保性的要求。鼓励发展反映发动机重要参数的高性能、高精度、智能化传感器，如高精度压力、流量以及废气成分等传感器。鼓励发动机故障诊断技术的发展，特别是车载故障诊断（OBD）系统开发。

5.3.2 内燃机增压系统应用技术

增压技术已经成为内燃机的节能减排的重要技术途径。目前国外先进的柴油机无论排量大小几乎全部采用增压技术，汽油机采用小排量、缸内直喷技术和涡轮增压技术，也逐渐成为降低燃油消耗率的主要路线。国内的柴油机为了实现国Ⅴ、国Ⅵ排放标准和进一步降低燃油消耗率也正沿着国外发展的路径，积极研发和采用新的增压技术。“十三五”期间，一方面要加大增压器的自主研发力度，要通过涡轮增压产业的技术进步和技术改造实现国产涡轮增压器对乘用车汽油机和商用车柴油机节能减排的技术支持，并提高国产涡轮增压器的市场占有率。另一方面要提高国内增压器生产制造企业的研发和生产制造能力，提高制造水平。为了实现这一目标，需要研发和采用下列先进技术。

针对内燃机气体管理系统，开展内燃机气体管理系统包括内燃机排气过程的能量传递与损失控制、排气能量在涡轮中的高效转化、EGR 工况对涡轮增压系统的能量分配的影响及对策、复杂进气系统的流场畸变与控制的研究。掌握内燃机进排气系统与涡轮增压器协同优化设计方法，减少换气过程能量损失，提高废气能量的利用率，适应内燃机全工况范围对进排气与增压系统的要求，达到提高柴油机经济性和利用 EGR 减少 NO_X 排放的目的。

电控可调增压器是目前增压器发展方向。这种增压器可以按照内燃机工况的要求实时调整增压压力，但是由于增压器工作环境十分严酷，温度高、排气中带有颗粒物，要保证在这样的环境中增压器的喷孔可以自由转动、调整是十分困难的。这也是制约我国增压器赶上国际先进水平的技术瓶颈所在。针对柴油机电控可调增压系统，开展可变几何涡轮增压器设计制造、二级增压系统和增压系统调节与控制技术的研究。对可变几何涡轮增压器，主攻方向是提高改变几何截面时的绝热效率，提高控制执行器的控制精度和减少滞后量。二级增压技术主要是掌握增压系统的匹配方法，在增压系统控制方面提出并研发创新性的方案以提高增压系统的绝热效率。

针对乘用车汽油机增压器，开发重点在于提高小型涡轮增压器的气动效率、

降低增压系统噪声、克服热负荷和调节控制元件技术。在涡轮增压器的可靠性、生产一致性和质量管理方面有所突破。

针对机械增压与电辅助增压，以提高内燃机的加速性和低速转矩为目标。开展机械增压器设计开发工作，使我国增压器行业在高端乘用车应用领域具有一席之地。电动增压或电辅助增压是增压技术的发展方向之一。电动增压或电辅助增压的研究重点是开发高效、高转速的一体化电动机 / 发电机，同时对于含有电动机转子的增压器转子轴承系统进行转子动力学特性研究。

开展增压器可靠性设计与寿命评价体系的研究，重点研究轴系、叶轮和密封元件，通过研究提高我国涡轮增压器的可靠性及使用寿命。

5.3.3 高效内燃机排气后处理技术

为了满足国Ⅴ以上的内燃机排放法规要求，单纯依靠内燃机机内净化已经十分困难。内燃机排气后处理系统是实现产品满足排放法规要求必要的技术措施，开发高效催化剂是系统的核心和关键。

1. 汽油机催化剂方面

1）开发满足国Ⅵ以上法规要求和 CO_2 排放需求的排放控制技术、催化剂产品技术和排放后处理系统集成技术。

2）开发汽油车排放颗粒物的控制技术 ,TWC、GPF 和 TWF 技术，研究节能减排（油耗和 CO_2 的限制）汽车发动机技术对三效催化剂的影响；开展 WLTP/RDE/FTP 等不同工况排放控制技术研究，研究并建立国Ⅴ整车耐久性模拟评价体系和方法；研究并建立 OBD 件制备和测试方法。

3）结合缸内直喷发动机（GDI）技术、稀薄燃烧技术、启停技术、混合动力技术、替代燃料技术等新型内燃机技术发展方向，进行排气后处理组合匹配应用技术研究，着重解决 HC 冷启动、CH_4 氧化、高速 NO_X 排放控制等关键技术问题。

4）稀燃 NO_X 净化 LNT 催化剂技术开发。关注非常规尾气排放，开发出适用于不同发动机特点的排气后处理系统。

2. 柴油机催化剂方面

1）围绕现阶段国Ⅳ、国Ⅴ排放标准，持续改进钒基 SCR 催化剂产品技术，提升催化剂低温活性和高温稳定性，加强催化剂产品一致性技术研究，开展产品技术降本，提升产品竞争力。

2）开发满足国Ⅴ以上排放标准要求的高效 NO_X 选择性催化还原技术（SCR），包括：分子筛型 SCR 催化材料合成及催化剂制备技术开发、固体氨 NO_X 选择性

催化还原系统（SSCR）开发等。

3）开发颗粒物捕集器（DPF）和具有催化功能的颗粒捕捉器（CDPF）技术。

4）开发 SCR 和 DPF 的（SCRF）组合集成技术。

5）开发满足国Ⅴ／国Ⅵ标准柴油车催化剂产品和关键装备，进行生产线升级和优化，形成国Ⅴ／国Ⅵ标准柴油车催化剂产品的生产制造技术。

6）开发满足国Ⅴ、国Ⅵ标准的柴油车后处理系统整车集成技术；研究 EGR、DOC、DPF 和 SCR 同时集成使用的柴油车后处理技术路线，根据发动机排放特点和工况要求不同，形成多种技术方案。

3. 燃气机催化剂

开发满足国Ⅴ排放标准的 CNG 催化剂，针对不同发动机的燃烧特点确定催化剂产品的开发技术路线，根据开发路线和客户设计目标进行对应性开发；研究轻型双燃料车用 CNG 催化剂技术；建立 CNG 催化剂的耐久性模拟测试评价方法。

5.3.4 替代燃料高效应用技术

当下我国石油进口依存度不断高企，石油能源安全面临很大压力，替代燃料在内燃机上高效利用，不仅有利于缓解对石油能源需求的压力，而且有利于提高能源利用率和减低有害物的排放。我国的能源禀赋是“缺油、少气、相对富煤”，目前可以对石油燃料实现规模替代的燃料主要是天然气、乙醇和甲醇三种，其他的替代燃料如二甲醚、生物柴油等暂时还处于研究开发阶段，另外一些如丁醇类燃料尚处于研究阶段。在规模替代燃料中，乙醇燃料由于产量每年不足 200 万 t，所以乙醇的应用方式主要是直接掺入汽油，形成 E10 的酒精汽油在市面上使用。因此，立足于国内能源资源特性，能够满足规模化替代石油能源的燃料主要是天然气和甲醇。

1. 天然气高效燃烧技术

（1）提高压缩比和进气增压中冷　针对天然气燃烧速度低、热值高的特性，为了实现高效燃烧，在点燃式天然气燃料发动机上提高压缩比是主要的途径之一。天然气的主要成分是甲烷，具有高辛烷值的特性，通常高过普通汽油 20 个辛烷值单位左右。提高压缩比，有利于使点燃式发动机获得更高的热效率。另外，在天然气中适度掺入一定氢气来提高天然气传播速度，是提高天然气发动机热效率的一种途径。

（2）天然气压燃式燃烧　压燃式发动机由于压缩比高，是提高天然气热效率的重要途径。但是因为天然气不易压燃，一般在压燃式发动机上应用采用柴油

引燃。柴油引燃的能量高，克服了天然气火焰传播速度低的不足，可以大幅度提高发动机热效率。这种柴油／天然气双燃料发动机是目前有一定应用的双燃料发动机。这种柴油引燃天然气的双燃料发动机，天然气或由压缩状态或由低温状态转来，喷入进气道后膨胀吸热，降低了进气温度，延长了柴油的滞燃期，致使放热集中，提高了燃烧等容度，使热效率也有所上升。

2. 甲醇燃料的高效燃烧技术

（1）提高发动机的压缩比　甲醇燃料同天然气一样，也是一种高辛烷值的燃料，提高压缩比是重要的技术途径。目前应用甲醇燃料的点燃式发动机，多由汽油机直接转换而来，应用中仅根据甲醇的热值不同而采取直接放大燃料的喷射信号的方法，甲醇的特性没有得到发挥。提高此类发动机的重要方法首先是要充分利用甲醇的高辛烷值特点，提高压缩比，并在燃烧室结构上采用增加室内空气运动的方式来强化甲醇混合气的均质化，以提高甲醇的燃烧效率。在工作中要注意避免因发动机压缩比提高而引起的爆燃等异常燃烧问题。

（2）应用柴油甲醇二元燃料燃烧技术　甲醇类似于天然气，着火温度高，难以压燃。采用柴油引燃的方式是解决此问题的主要方法。当采用二元燃料方式燃烧甲醇时，柴油喷进由进气管进入的甲醇均质混合气中，由于甲醇对柴油有较强的着火抑制作用，柴油在着火前会大量蒸发形成均质混合气，这样与已经是均质混合气的甲醇一道着火燃烧，类似于混合气均质压燃的方式。柴油甲醇二元燃料燃烧与传统的点燃式发动机火焰传播以及压燃式的扩散燃烧不同，它是一种燃料喷进另一种燃料的热氛围中，单位时间里的燃料燃烧质量增加，所以动力性比传统压燃式的柴油机的加速响应快。因为燃烧的定容度提高，热效率也随之增加。目前这种二元燃料燃烧可以使发动机的热效率提高 10% 以上，是一种节能的重要途径。由于甲醇含氧量高、高汽化潜热，甲醇喷进发动机进气系统会降低混合气进气温度，减少进气中氮气含量。因此，一旦燃烧，混合气燃烧速度快、温度低，打破了柴油机存在的 NO_X 和颗粒物排放矛盾，大幅度改善了发动机排放品质。但是，甲醇在采用与柴油掺烧方式时，排气中会含有一定的一氧化碳、未燃甲醇和少量的甲醛等有害气体，需要增加一个氧化型的后处理装置加以消除。目前，该技术已经在商用车上得到一定应用。

5.3.5　零部件集成模块化应用

平台化和模块化是当今现代化内燃机设计理念。建立相应的平台不仅有利于加快内燃机整机开发速度，也有利于降低开发成本。更重要的是方便了售后服务

体系建立，可以更好地满足市场的需求。开展缸套、活塞、活塞环、活塞销组件，配气机构组件，曲轴、连杆、轴瓦组件的集成应用研究，提高内燃机整机的机械效率，提高内燃机的经济性，满足新一代内燃机产品的各项性能指标要求和可靠性要求。

活塞、活塞环、活塞销、缸套组件是内燃机做功最主要的零部件集成模块，同时活塞环与缸套的摩擦损失占内燃机摩擦损失的 50% ～ 65%，高度重视各零部件高性能且轻量化材料的研究应用，高承载能力且低摩擦表面处理及配副的研究应用，集成模块综合性能研究，对整机性能的提高具有重要的意义。

活塞、活塞环、活塞销、缸套动力模块中单件和组件均有专用技术和特点，涉及到材料、表面处理、精度、表面粗糙度、配副性能等。各零件的性能及其相互之间配副性能对提高内燃机的机械效率、经济性、可靠性、寿命有直接的影响。活塞、活塞环、活塞销、缸套动力模块集成应用技术路线要本着轻量化和低摩擦开展工作。未来的零部件模块化主要围绕以下方面开展工作。

1）对适应欧Ⅴ、欧Ⅵ内燃机性能的零部件材料及工艺技术进行深入研究。两条路径一是轻质高强度有色金属材料，二是黑色金属，研究活塞的耐高温性能、包括高温机械强度和抗高温疲劳冲击性能，深入研究适应不同燃烧方式活塞的结构设计，使之重量轻，降低往复惯量，提高机械效率。

2）表面处理研究。

a）活塞头部采用表面陶瓷硬化处理，提高耐高温、耐腐蚀性，防止变形熔顶。

b）活塞环槽表面处理，提高活塞与环的耐磨性，降低摩擦因数。

c）活塞裙部喷涂石墨及二硫化钼处理，减少与气缸壁的摩擦因数。

d）活塞环一道环外圆表面进行类金刚石及陶瓷化处理，提高高温性能，耐磨损性能，减少摩擦因数，减少高温下对缸套的拉伤。

e）油环采用合金钢质油环减轻重量，氮化处理提高耐磨性以及类金刚石涂层减少摩擦损失。

f）气缸套内孔超微珩磨技术，形成超细平台网纹，并进行碳、氮、硫共渗技术，减小缸套与活塞环间的摩擦因数，减少机油消耗。

g）活塞销轻量化及低摩擦处理技术，如 DLC 处理减小摩擦因数。

3）积极落实“中国制造 2025”，加快推进两化融合，促进制造过程技术进步，提高制造精度及各零部件的一致性，提高整机可靠性。

4）鼓励行业整合形成专业化组件集团，达到配组供应整机厂直送工位。

5）建成新一代动力模块组件（活塞、活塞环、活塞销、缸套）工程试验室，形成产品开发和试验平台。

集成模块化的应用可给内燃机行业带来巨大的效益。零部件集成模块化可使装配厂面积缩小；用人少，生产率大幅提高；存货下降；使主机厂交付率大幅提高；管理更集约化，供应链管理简约。

模块化集成应用技术是当前装备制造业发展中最具影响力技术，将使内燃机制造业产生质的飞跃。

5.3.6 内燃机低摩擦技术应用

提高内燃机的热效率，是降低能耗的主要途径之一。摩擦损失在内燃机燃料消耗中约占 10%。开展低摩擦技术的开发和应用研究，主要技术包括摩擦副材料优化选择、优化设计、优化微观质量控制和表面涂层技术、优化固体润滑涂层、优化流体润滑剂，建立技术标准体系并推广应用。

企业对低摩擦技术的积极性仍然来自行业和政府的政策引导。应鼓励相关大学积极设立低摩擦技术专业学科，积极培养人才，形成梯队。

5.3.7 内燃机用测试技术及设备开发

在内燃机工业的发展历程中，先进的测试技术及设备对于促进内燃机产品的技术进步，保障内燃机产品及零部件在生产制造过程中的质量具有重要意义。内燃机的测试设备是本行业的重要短板之一。随着内燃机制造过程精细化和高度自动化，对于测试和检测设备要求越来越高。另外，内燃机的排放检测也已经成为生产企业必备的装备。目前这些设备大都来自国外生产企业。随着对高效节能环保型内燃机的需求日益强烈，以及我国内燃机工业转型升级的需要，内燃机及关键零部件测试设备和技术将快速发展和提高，这必将以集成多种传感器、融合信息技术、互联网技术和人工智能技术为特点，融入内燃机智能制造体系中，支撑先进的高效节能环保型内燃机技术及产品的发展和产业化。为了实现从中国制造到中国创造，补上检测技术和测试设备的短板势在必行。未来的工作将集中在以下方面。

1. 开发内燃机智能化动态测试系统

开展可协调控制测功机、变频柜、燃油控制系统等多种设备的智能化动态主控软件的研发，实现 PID 协同与多数据采集通道采样，数据存储能力实现每个通道存储频率 1kHz，能够进行动力总成的稳态、瞬态、动态及道路工况模拟试验。

2. 研制高性能的内燃机排放分析设备和传感器

开发高性能的内燃机排放分析设备，研制宽域氧传感器、NO_X 传感器。满足超低浓度排放的内燃机开发、测试的需求，满足国Ⅴ、国Ⅵ、美国 EPA 等最新世界排放标准的认证，满足直接采样内燃机排放检测要求，具有高精度、高响应速度、高稳定性、压力和温度自动补偿、自动调零、易维护等特点。THC、CO、CO_2 和 NO_X 测量的线性度和重复性好。颗粒物测量装置的测量范围达到满足排放法规的测量仪器要求。

3. 开发关键零部件在线检测系统

针对内燃机燃油系统、增压系统、排气后处理等关键零部件制造过程在线检测技术与装置，检测试验设备需要具备较高的智能化水平和信息技术水平，实现内燃机关键零部件制造过程中在线质量智能检测以及零部件质量数据可追溯性，智能检测分选设备精度达到 1μm，压力测量及流量测量精度达到 ±0.2%。

开发基于大数据系统的内燃机及其零部件的设计、测试、匹配和应用的信息化技术平台，促使关键数据和知识的积累整合，有效利用测试数据指导仿真技术、模拟计算技术，完成内燃机关键零部件及系统的可靠性集成数据库建设，促使内燃机的设计开发走向数据化和知识化。

5.3.8 车用混合动力内燃机应用技术

随着新能源汽车研发的快速发展，传统内燃机在新能源汽车中的应用开发也出现了多种形式。国际上的实践表明，采用传统内燃机与电动机相结合的混合动力系统在节能方面已经显示了强大的生命力。针对内燃机在新能源汽车中的应用特性，综合布置、性能、成本及功能实现，车用混合动力内燃机主要以阿特金森循环发动机、高功率密度增压直喷发动机及小型化增程器三类为主，同时开展内燃机附件电子化开发。

鉴于国际上先进国家在混合动力方面的早发优势，打破其相关技术专利垄断，大力促进创新技术发展是我国发展自己混合动力系统的关键。围绕发展具有自主知识产权混合动力的需要，开展新一代高效发动机平台研发（平台化、模块化、通用化、轻量化），同步考虑传统动力汽车和新能源动力汽车的共同的需求，以解决原有产品在新能源汽车应用中的集成差、轻量化差、布置难、效率低等瓶颈问题。

1. 超低油耗阿特金森循环发动机

混合动力汽车由于电机的辅助驱动作用，对发动机的动力要求相对降低，因

此可以采用阿特金森循环技术，在牺牲部分动力性的前提下大幅提升发动机效率，降低燃油消耗，结合电机对发动机的工况调节进一步降低整车油耗。阿特金森循环技术通过控制发动机进气门早关或者晚关，实现发动机膨胀比大于实际压缩比，结合爆燃控制、进排气优化、燃烧优化等措施，可实现发动机全 MAP 油耗大幅降低。同时，阿特金森技术几乎不增加发动机成本，因此在福特、丰田、现代、本田等车企中得到广泛应用。

2. 高功率密度增压直喷发动机

混合动力系统由于在传统发动机上增加电机驱动，因此动力总成机舱布局较为困难，需要开发高功率密度的小型化发动机，在保证动力性的同时满足整车布置要求。该类型发动机大多采用小型化设计，通过低摩擦技术实现低油耗、低排放，配合涡轮增压和缸内直喷技术实现高功率密度，体积大幅减小，利于混合动力总成的机舱布置。随着插电式混合动力汽车的快速发展，小型化增压直喷发动机的布置和性能优势愈加凸显，未来将得到大范围推广应用。

3. 电动车增程用小型化发动机

针对增程式混合动力汽车（Extended-Range Electric Vehicle，EREV）开发的增程式发动机或称为增程器（Range Extended Engine）。发动机只用作发电，不直接参与驱动车辆。这是在电池成本居高不下的情况下，提高纯电动汽车续航里程的低成本技术路线。由于发动机与道路负荷不耦合，不受整车运行工况的影响，发动机经常保持在低能耗、高效率和低污染的状态下运转，以点工况运行为主。该类型发动机结构紧凑、尺寸较小，成本较低，通常采用转子发动机或者单、双缸发动机，方便整车的灵活布置。

4. 智能化发动机附件

为适应混合动力汽车发动机常常处于间歇工作状态（怠速停止、纯电动）的要求，进一步缩小发动机尺寸，需要开发发动机智能化驱动附件。智能化附件包括电动压缩机、电子水泵、电动助力转向、电子调温器和电动真空泵等技术，实现混合动力汽车更低油耗、更紧凑。

5.3.9 冷却润滑系统模块化集成技术应用

开展智能集成技术在内燃机冷却系统中的设计与应用。采用智能集成的方法是当代内燃机冷却系统研究的主要课题。集开关水泵、变量水泵、电动水泵、节温器水泵、机油冷却器、滤清器等于一体的模块设计，既具有传统水泵的冷却功能又具有现代发动机节能技术；结构紧凑，效率高。一体化设计减轻了发动机

重量，智能化设计把电子控制、机械传动、流体学等多种科学融为一体， 通过ECU控制，优化发动机的暖机性能，达到节能高效、清洁环保、安全可靠、轻量化、集成化、智能化的设计目标。随着汽车制造向小排量、大功率涡轮增压和混合动力方向发展，冷却水泵向高效率、轻量化、集成化方向发展。当水泵输出功率被要求在400W以内时，ECU控制下的智能电动变量水泵技术将会得到应用，水泵的智能化进一步提升。

机油泵、变速器油泵、动力转向泵和燃油系统输送泵都是中低压系统，以齿轮泵为主，包括内啮合/外啮合，渐开线/摆线等不同结构类型，叶片泵在汽车流体系统中的开发和应用得到了快速发展，目前已经成为变排量机油泵和动力转向泵的技术主流。汽车油泵技术涵盖了齿轮泵，转子泵，叶片泵和柱塞泵等容积泵类型，工作压力涵盖了从6bar（1bar=10^5Pa）以下的发动机润滑系统到3 000bar左右的高压共轨系统。

容积式油泵是内燃机润滑系统的核心部件，在内燃机润滑系统，自动变速器液压系统，汽车转向系统和发动机燃油系统中获得了普遍应用。流体介质包括机油，液压油和燃油，其中内燃机润滑系统的应用环境和工况比较复杂，燃油喷射系统需要非常高的工作压力。

开展智能化机油泵、电磁阀、无刷电机等核心部件的应用研究。完成可变排量，两级压力控制机油泵的工程化研制，重点研究针对智能化机油泵脉谱（MAP）控制技术。

通过开关电磁阀控制的可变排量机油泵可以实现低压（低速）和高压（高速）两级压力控制和可变排量，通过电液比例阀控制的可变排量机油泵可以实现多级压力控制和可变排量，相对于开关控制而言，可以补偿机油温度变化的影响，小功率的汽车油泵采用无刷电机直接驱动获得了广泛的研究和应用。

开展零部件集成应用研究工作，针对电液比例控制润滑系统、电驱动油泵系统、燃油喷射系统控制、ECU控制、发动机标定等领域，提升产品的智能化水平。

5.3.10 内燃机热力学设计与管理应用技术

内燃机是热力机械，承担着将燃料化学能转化为热能，再将热能转化为机械能的重任。内燃机工作过程就是热量的管理过程，如何将有限的燃料燃烧能量尽可能多地转化为有效功是内燃机实现节能的关键。因此，从系统整体和热力循环角度，通过冷却及进排气系统与发动机的综合集成、全工况优化及余热利用，实现内燃机高效热功转换。热管理为气缸全工况范围热功转换提供最佳温度环境，

减小冷却系统功耗，通过余热利用提高热功转换效率。重点开展智能冷却、余热利用和总能优化等以下几方面的技术研发。

1. 智能冷却技术

开展电驱动与控制的冷却水泵、风扇、节温器等部件研发，开发智能冷却控制系统，根据冷却液温度或发动机部件温度控制冷却液流量和风扇转速，使发动机气缸在不同工况下均工作在最佳温度环境下，并减小低热负荷工况的水泵和风扇功耗，提高发动机的全工况热功转换效率。

2. 余热利用技术

开展动力涡轮、有机朗肯循环等余热利用技术应用研究，通过回收发动机排气及冷却系统余热提高发动机的燃料能量利用效率。加快动力涡轮复合系统产品工程化开发，形成产品，在国内自主开发的柴油机上推广应用。突破有机朗肯循环小型化设计技术，突破膨胀机、工质泵、蒸发器等关键部件研制技术，推进有机朗肯循环系统产品开发和应用。

3. 总能优化技术

从发动机系统整体和联合循环角度，研究发动机缸内热功转换、增压及冷却、余热利用等过程的相互影响，开展增压、冷却与余热利用系统综合集成与全工况优化设计研究，大幅提高内燃机热效率水平，促进高水平内燃机产品研发。

5.3.11 内燃机再制造技术

开展高效无损拆解及组装技术在内燃机及其零部件再制造领域的应用研究。深入研究缸体、曲轴、连杆等关键零件剩余寿命评估和可再制造性评价技术，开展旧件内部微损伤无损检测方法和表征技术研究，开发高效、适用的复合检测工艺及仪器设备。围绕清洗和清理技术的节能、减排需求，开发高效、绿色的复合、成套清洗清理技术与产业化应用装备。探索 3D 打印等增材制造技术、自修复、自愈合等技术在内燃机再制造领域的应用；研究再制造修复工艺的形、性调控和质量保证技术；实现激光熔覆技术、等离子喷焊技术、电刷镀技术、热喷涂技术、冷喷涂技术等的产业化应用和服役安全性保证。开发应用内燃机再制造的性能优化匹配和排放升级等关键共性技术。开展正、逆向物流融合集成技术，实现再制造产品的可追溯和信息化管理。针对不同零部件及其再制造修复工艺特点，制定建立再制造产品技术标准体系和规范。围绕内燃机再制造产业特点，研究建立内燃机再制造检测、分析、信息共享等若干基础共性技术研发平台和创新平台，开展政产学研用协同创新，培养急需再制造人才，促进产业健康、持续发展。

5.3.12 高压燃油喷射技术

燃油喷射系统是发动机的心脏，是决定发动机及整车动力性、经济性和排放性能的关键核心部件。我国压燃式发动机即将实施国Ⅴ排放法规、点燃式即将实施国Ⅴ排放法规，同时也将实施油耗法规，电控高压共轨燃油喷射系统（CRS）将是压燃式发动机唯一的技术路线，而汽油直喷系统（GDI）也必将成为点燃式发动机最佳的技术选择，开发和完善这两种燃油系统技术是“十三五”期间国内燃油喷射企业的重要任务。

针对电控高压共轨燃油喷射系统（CRS），机械部件要实现 220MPa 以上的稳定系统压力，需要进行零件强度和密封结构设计以及工艺技术开发；要研究提升高压油泵的供油效率和喷油器响应速度等关键性能指标；关键零部件和材料如高速电磁阀、进油计量阀、轨压传感器、磁性材料、高强度合金材料等开发工作也要同步进行；开展喷油控制技术、燃油喷射技术状态对降低油耗和排放控制的影响的研究，提出配套应用优化技术方案；电控单元技术要求对燃油系统、发动机及整车的控制功能，对 SCR、柴油尾气过滤器（DPF）以及 SCR+DPF 的尾气后处理控制及在线诊断（OBD）诊断功能；进行发动机及整车达国Ⅴ及以上排放及油耗标准的标定试验开发，满足法规和客户对动力性、经济性和排放性能的要求；开展燃油喷射系统可靠性设计与寿命评价体系的研究，重点研究高压油泵总成、喷油器总成，通过研究提高我国高压燃油喷射系统的可靠性、使用寿命。

针对汽油直喷系统（GDI），机械部件要实现 250bar 以上的稳定系统压力，需要进行零件强度和密封结构设计以及工艺技术开发；要研究提升高压油泵的供油效率和喷油器响应速度等关键性能指标；关键零部件如高速电磁阀、高压调压电磁阀、轨压传感器、氧传感器等开发工作也要同步进行；开展汽油直喷系统检测设备的开发，对喷油量、喷射速率、响应速度等关键指标进行测试；开展缸内高压直喷喷油控制技术、燃油喷射技术状态对降低细微颗粒物有害物质控制的影响的研究，提出采用汽油尾气过滤器（GPF）后处理装置优化技术方案；电控单元技术要求对燃油系统、发动机及整车的控制功能，对 GPF 尾气后处理控制及 OBD 诊断功能；进行发动机及整车达国Ⅴ及以上排放及油耗标准的标定试验开发，满足法规和客户对动力性、经济性和排放性能的要求；开展燃油喷射系统可靠性设计与寿命评价体系的研究，重点研究高压油泵总成、喷油器总成，通过研究提高我国高压燃油喷射系统的可靠性和使用寿命。

5.3.13 船舶发动机控制技术

随着船舶动力的尾气排放法规的实施及逐步加严，开展了电控燃油喷射、高增压、燃烧优化、EGR、SCR、清洁燃料等机内、机外排放控制技术应用研究和新产品开发，为排放达标提供解决方案，形成产业化能力。

以国内自主开发机型为重点匹配应用对象，对标国外新一代船用柴油机电控管理系统技术，完成柴油机自主电控管理系统产品开发，并在国内主机厂推广应用。突破一批船机环保产业配套产品关键技术，培育一批拥有自主知识产权的核心骨干企业和一批基础科研设备配套完善的基地。提高配套产品标准化、系列化和系统集成水平，船机环保产业产品创新和产品性能达到国际先进水平。船舶发动机产业产品技术路线如下：

1. 突破电控核心技术，开发自主电控产品

自主研发，全面突破船舶柴油机智能化电控技术，包括船舶柴油机控制、安全保护、监测报警和实时在线故障诊断技术，达到国际先进水平。“十三五”期间，完成我国船舶柴油机电控系统产品系列策划。首先突破柴油燃料船舶发动机电控系统工程化开发，形成产品，通过船级社型式认可，在国内自主开发的柴油机上推广应用。在此基础上，开展气体燃料发动机控制系统产品开发，积累工程应用经验，并持续改进。

2. 加强机内外排放控制技术的应用研究，培育相关产业

加强船机机内净化技术自主研发能力，突破高效清洁燃烧要求的“油、气、室”匹配技术、废气再循环技术、米勒循环技术、机内净化措施综合优化技术等，重点推进船机 EGR 技术产品验证和 EGR 冷却器、EGR 阀等关键部件的产品研发。推进 SCR 尾气后处理装置的开发应用，加强低温型催化剂和尿素喷射系统的研制，逐步实现催化剂模块、电控单元关键件的自主设计与制造，提升 SCR 后处理装置系统与柴油机的系统集成水平。

3. 突破清洁高效气体燃料发动机开发技术，加快产品开发和应用

掌握清洁高效船用气体发动机正向设计开发和制造技术，突破气体燃料船用发动机热效率提升技术，突破抗热腐蚀节气门、燃气喷射阀、电子控制单元等关键部件研制技术，掌握燃料系统、增压系统、控制系统的综合匹配标定技术，加快高水平气体燃料船用发动机产品开发和应用。

4. 加强政策导向，在重点区域建立船机环保应用示范项目

大力推进船机环保技术和产品的工程应用、产业培育，推进气体燃料供应基

础配套设施建设，建立船机环保产品和技术的应用示范项目。制定并实施船机环保技术应用补贴政策，推进长江、珠江等重点流域的节能环保型船机的更新换代，加速污染严重的老旧机型的淘汰进度。引导船机生产企业加快节能减排技术和新产品的推广应用，持续降低船舶发动机有害污染物排放，有效控制船舶造成的大气污染对人民群众公共健康的危害。

5.3.14 非道路移动机械用柴油机

针对我国非道路移动机械用柴油机产品还普遍存在能耗较高、排放较差等问题，开展多功能、智能化、经济型的非道路移动机械用柴油机产品。重点研究柴油机的进气处理系统、滤清和后处理系统、燃油系统、电控系统和缸内燃烧优化五个关键问题。重点开展以下技术的研发：

1）优化柴油机燃烧系统，推广应用电控高压燃油喷射系统。应重点开展柴油机电控高压燃油喷射系统的结构优化与设计、工艺技术研究与改进、不同配套用途发动机的适应性改进、各种性能试验和应用研究、质量可靠性考核与攻关、与整机／整车的各种匹配标定等。发展排气后处理技术，进一步降低排放，采用机外净化措施，包括废气再循环、氧化催化技术、脱 NO 催化剂、颗粒捕集器等。

2）采用低摩擦、综合热管理、零部件集成与控制技术，提高燃烧效率和机械效率、降低柴油机能耗。广泛应用电子控制技术对柴油机燃油、进气、排气、冷却等系统进行集成控制，对环境、工况和故障等做出反应，实施全自动的管理。

3）进一步发展高效率、高压比的二级／多级、变截面涡轮增压系统及中冷技术，优化增压器与燃油泵的匹配，以满足现代排放法规和更高动力性和经济性的要求。

4）开展柴油机与传动系统优化匹配技术的研究，优化液力机械、静液压传动技术，提高液力变矩器传动效率，解决装载机、压路机、挖掘机和叉车等非道路移动机械与柴油机的优化匹配问题，拓宽柴油机的经济油耗区。

5)发展混合动力驱动技术和替代燃料，开展油电混合驱动的节能技术的研究。开展非道路移动机械用柴油机替代燃料的研究。

5.4 产业结构调整目标

内燃机行业认真执行“十二五”规划要求，进行了产业结构调整、加大重组整合力度。在“十三五”阶段，重点培育若干个规模大、水平高、具有国际竞争力的内燃机整机大型企业集团和核心关键零部件等企业。提高潍柴、玉柴、锡柴、

常柴、长城汽车及奇瑞汽车等整机企业，天润曲轴、中原内配、无锡凯隆和辽宁新风等关键零部件行业排头兵企业的整体能力。积极推动内燃机与配套企业之间的战略重组与整合；积极推动和促进主机企业间及相关产业之间的合作，采用资本置换、协同合作、战略合作伙伴关系等不同方式，进行互通（相关产品）、互补（优势）、互惠（共享信息、供应商和市场服务体系等）多元化合作。

坚持对外合作，鼓励企业与国外跨国公司进行多种形式的联合与合作，加快企业国际化进程，促进产业结构升级，如：潍柴动力股份进行战略重组，专注产品结构调整，打造全系列产品组合竞争优势，加快市场结构调整，形成覆盖全领域的市场布局，加快技术投入改造，推动产业优化升级，实现我国政府提出的“一带一路”发展战略。

5.4.1 产业结构调整情况

在产品方面，以内燃机为主要配套动力的我国汽车工业经过多年的高速发展，产量和销量已连续六年位居世界第一；工程机械被广泛应用于基础建设各领域，并远销国际市场；农业机械为现代化农牧业生产提供了保障和支撑；固定动力装置在国家基础设施和城镇化建设中发挥了不可或缺的作用；内河航运、水面作业和近海捕捞船舶仍将有较大的增长，所有这些领域都将持续对配套的内燃机产品提出更高的要求。

我国政府提出“一路一带”发展战略，推进了亚欧非国家和地区的交通、能源等基础设施建设。伴随我国城市和社会主义新农村城镇化建设，都将为内燃机产品提供一个非常广阔的市场。

随着国家排放法规的严格实施，内燃机核心技术和关键零部件将得到快速发展和应用，高效清洁内燃机产品的研发和推广应用，将会促进自主品牌电控燃油喷射系统、高效增压器、高效后处理装置的广泛应用。未来将重点围绕以下方面做好工作。

1. 能力指标

随着企业对产业升级的重视，行业企业不断加大研发投入，柴油机企业不断采用增压中冷、共轨 / 单体泵、EGR、SCR 等新技术。

内燃机企业平均拥有发明专利 12 项，其中低于 12 项的企业占比 74.60%，多于等于 12 项的企业占比 25.40%，拥有发明专利的数量最多的为 151 项。平均拥有实用新型专利 72 项，其中低于 72 项的企业占比 77.42%，多于等于 72 项的企业占比 22.58%。其中超过 100 项的企业占比为 17.46%，最高者达 1 055 项。

平均拥有外观设计专利 32 项，其中低于 32 项的企业占比 83.61%，多于等于 32 项的企业占比 16.39%，其中最高者达 696 项。

2. 燃油消耗量和排放量指标

内燃机是我国石油消耗的最大主体产业，内燃机动力每年消耗我国石油的 59%。内燃机产品 CO_2 排放量占全国总量的 10%，氮氧化物排放量占全国总量的 30%，颗粒物排放超过 60 万 t，内燃机排放污染物已成为影响空气质量的重要因素之一，节能减排任务艰巨。截至“十三五”末期，2020 年新生产的乘用车 CO_2 排放量从目前的 130g/km 降低为 95g/km。温室气体排放法规政策取代有害物质排放法规成为推动内燃机技术发展的主要驱动力。

3. 行业发展

“十一五”“十二五”两个五年计划期间，中国内燃机行业企业申报中国机械工业科学技术奖及获奖情况呈逐年上升趋势。“十一五”期间，内燃机全行业科学技术奖共评出一等奖、二等奖、三等奖 80 项，这些成绩充分表明，经过行业内广大工程技术人员的长期努力奋斗，使我国内燃机领域科学技术已进入快速发展期。“十二五”期间，内燃机行业再评出特等奖、一等奖、二等奖、三等奖 90 项，一些奖项推荐获得国家科技进步奖。标志着内燃机工业的发展，获取政府主管部门在政策和项目方面的有效支持，科学技术奖的获得很重要。科学技术奖是对广大科研人员和工程技术人员以及组织管理人员工作的肯定，也是对成果奖所属单位和部门支持科技进步和发展的肯定，更是成果应用到产品后提高市场竞争力的有力保障。可以看出，由科学技术拉动产业升级和推动产品发展，正在内燃机行业形成良性循环。

“十三五”期间积极申报国家奖项，以推动产业升级和技术进步。

5.4.2 产业结构调整的挑战

内燃机已进入高科技时代，面对世界各国日益严格的环保和能源以及可持续发展要求，目前大的跨国集团和公司，都在利用各种高科技手段研制发展低排放、超低排放、准零排放、零排放的技术。为了适应日益苛刻的排放法规要求，低排放汽油机、柴油机、单一清洁燃料（氢燃料等）发动机的开发和电动、燃料电池动力、混合动力的研发，成为世界各大汽车公司、发动机公司的主要研究方向。

我国正处在从内燃机大国向强国转变的关键时期，内燃机行业面临着技术、市场以及产业结构调整等各方面的严峻挑战。内燃机的创新重点是节能减排，发

展多元化动力，而国家参照国际研发水平制定的整体节能、减排标准和实施时间表，给企业带来不小的压力。自主创新能力不强，缺乏行业整体核心技术，这无疑是中国内燃机行业将要面对的严峻挑战。

来自市场的挑战主要分为三个层面：

一是跨国集团将中国市场列为全球战略发展的重心，纷纷采用独资或控股等形式在中国布点建厂，将其整合成为其集团零部件和发动机的生产基地。

二是由于环保法规更加严格，能源及原材料价格不断上涨，市场恶性竞争等因素的影响，市场低端柴油机产品进入艰难发展时期，小型内燃机（摩托车用、通用、农用）的发展在一定程度上受到了制约，难以满足国内、国外市场高速增长的需求；在大功率柴油机（船用、机车用、固定电站用）领域，亟待引进技术后消化吸收再创新，解决造船工业迅速发展而自主品牌主机供应迟缓的问题。

三是金融危机冲击绿色壁垒、品质与服务竞争加剧等，给内燃机出口带来负面效应。

产业结构调整是我国内燃机行业由大到强的必由之路，而来自结构调整的挑战也更为复杂，主要体现在以下几个方面：

一是产业结构、产品结构有特点，但在技术层面缺乏国际市场竞争力，零配件行业缺乏自主创新开发的实力，特别在全球经济复苏后的市场总供给上，将面临技术、材料、法规要求下的新挑战，目前行业的应对策略、方案和能力都不足。

二是产品竞争力弱。我国内燃机行业优势在于重型车用柴油机领域，而处于弱势地位的是轻型车和非道路移动机械用动力，乘用车用汽油机无整体实力，也无话语权，更谈不上优势。

三是我国内燃机工业在美洲（北美为主）、欧洲、东亚（日、韩）为主导的内燃机制造大市场中，除产能大以外无其他特色。

区域规模不突出，无特点，除以常州地区为主导的农用单缸柴油机在亚洲享有一定声誉外，车用、工程机械用、农业机械用等领域，特别是多缸机行业无区域品牌，无集团优势规模，无品牌带动下的团队规模。

四是基础零部件产业仍显凌乱，主要表现在：零件制造优势企业不多，且自主研发基础薄弱；部件制造企业合资品牌占主导地位，话语权旁落的现象尤为突出；点燃式、压燃式内燃机燃油系统制造企业面临国际知名企业在国内市场的垄断和竞争，中资企业已无技术优势可言。

五是环保压力增大。以内燃机为主要动力的交通、农业、工业机械排放的CO_2在环境总体排放中占的比例较大，其中与汽车生产量和保有量的急剧增加有直接的关系，大气中有 12% 的CO_2来自汽车的尾气排放（未考虑工业 / 农业 / 其他运输等内燃机排放）。 此外，我国非道路移动机械用柴油机的排放污染不可忽视，我国既是一个汽车生产大国，也是一个非道路移动机械生产消费大国。根据国家环境保护局最近统计，我国非道路用移动机械发动机微粒（PM）、氮氧化合物（NO_X）排放分别占整个移动排放源排放的 61%、42.2%。农业机械、农用运输车这两大类的一氧化碳（CO）、碳氢化合物（HC）、氮氧化合物（NO_X）和微粒（PM）排放，在非道路移动机械排放中的比例分别高达 89.7%、89.8%、71.8% 和 87.5%。

六是从能源供应看，迫切需要节能产品。我国自 2000 年以来，汽车（包括低速货车）汽油、柴油年消费量占我国石油消费总量的 50% 以上，鉴于日益严峻的环保和能源压力，我国政府特别制定了《中国应对气候变化国家方案》，节能减排成为我国的基本国策。

从世界各先进国家内燃机工业发展看，先进国家的内燃机工业已进入一个高科技、高投入、高产出时代，跨国公司大都利用全球性资源来发展壮大自己。新产品开发速度，产品的性能、品牌、质量、成本以及售后服务，已成为国际内燃机企业竞争胜败的决定性因素。目前，我国内燃机工业与跨国公司的差距较大，面临严峻挑战。

5.4.3 目标

针对我国内燃机工业与国际先进水平相比，在节能环保指标上仍有较大差距，关键核心技术欠缺，节能减排标准体系不健全，高能耗、高排放、低性能内燃机产品仍在广泛使用的现状，国务院办公厅发出了《国务院办公厅关于加强内燃机工业节能减排的意见》，对我国内燃机工业节能减排提出了明确的发展战略和目标要求。2015 年在国务院下发的《中国制造 2025》文件中，再次明确“高效内燃机”为落实国家节能减排总体发展战略的重点产品。两个文件赋予中国内燃机工业在新时期、新常态下的历史使命核心是：内燃机工业应强化自主创新研发、加速共性基础技术平台建设、优化上下游产业链建设、实施智能化制造、积极开展国际交流合作、加快实现产业技术升级。支撑配套整机产品技术进步和产业发展，服务于国内外两个市场。

在我国经济发展进入新常态时期，内燃机工业的结构调整、转型升级、提质

增效刻不容缓。面对我国内燃机产业大而不强、自主创新能力不足、产业规模优势不明显、质量效益不高的现状，转型升级和跨越发展的任务紧迫而艰巨。加强产业中同类产品生产企业间的整合，提高企业的集中度，提高行业自主创新能力，加速产品节能减排先进技术应用，支撑配套整机发展，组织实施绿色制造和智能化制造，提升行业总体实力，是我国内燃机工业从制造大国迈向制造强国的必由之路。

建设世界制造强国，内燃机工业必须紧紧抓住当前难得的战略机遇，积极应对挑战，加强统筹规划，突出创新驱动，制定扶持政策，建立激励机制，发挥制度优势，培育国际品牌，实现中国制造向中国创造的转变，中国速度向中国质量的转变，中国产品向中国品牌的转变。

实现中国内燃机工业结构调整，还应做好以下几个方面的工作：一是优化上下游产业链建设。鼓励内燃机制造企业与产业链上游（材料、零部件供应商）和下游（配套机械）以及加工制造装备生产企业建立紧密的合作关系，形成协调协同和同步可持续发展机制，实现合作多赢、集中优势、同步发展的目标。二是加快技术创新体系建设。通过国家科技计划（专项、基金等）和相关工程的渠道，加大对内燃机节能减排技术研发的投入力度。加强企业技术研究中心能力建设，推动建设一批内燃机工业国家工程研究中心，强化跨部门、跨行业产学研的结合，提高内燃机行业自主创新能力，加快突破内燃机产品节能减排关键核心技术，强化内燃机节能减排成熟技术的应用。加大人才培养力度，在关键技术领域培育一批领军人才，鼓励从国外引进优秀人才。三是推动政产学研用创新体系建设。建立内燃机行业创新链，优化集成科研力量，加强关键核心技术攻关，加快和促进成果转化。发挥内燃机政产学研用创新体系的作用，对重点产品和关键技术，开展专题联合攻关，实现技术成果共享，实现技术成果产品转化和市场应用。四是建立内燃机行业沟通、协调和服务机制。内燃机产品由于配套服务领域广泛，涉及多学科、多相关产业，做好协调服务、信息传递、反映行业发展需求和企业诉求尤为重要。开展此项工作须在政府和产业的支持下，发挥中国内燃机工业协会和相关产业协会的协调作用，协助政府做好行业发展规划，引导产业健康有序发展，为企业做好具有实效的服务工作。五是健全标准体系。以高效内燃机产品为主线，制定产品技术标准和相关标准，完善标准体系。制定替代燃料内燃机产品技术标准和内燃机再制造工艺技术、产品质量、生产管理等标准，对替代燃料内燃机和再制造产品发展进行规范。六是加强行业自律和监督管理。发挥行业协会

在加强行业自律、推广先进技术和经验、推动标准制定宣传贯彻等方面的作用。落实企业主体责任，充分调动企业的积极性和主动性。切实加强规范管理，强化监督检查，确保各项管理措施、法规标准得到严格执行。

实现我国内燃机工业产业结构调整，必须结合国家能源中长期发展战略，以及与电子工业、装备制造业、冶金工业、石化工业等相关产业领域的发展规划相结合。

落实《中国制造 2025》提出的实现制造强国战略目标的三步走战略。按照内燃机工业“十三五”规划的要求，进一步巩固我国内燃机世界制造大国的地位，实现产品生产制造智能化，推动行业提升信息化和智能化的发展，在核心技术、关键基础零部件、先进制造工艺和新材料应用上缩短与国际先进水平的差距，有效地提高产品质量和生产一致性，迈出中国内燃机工业发展战略的第一步。

培育具有较强国际竞争力的跨国公司和产业集群，提升中国内燃机产业在全球产业分工和价值链中的地位。提出并组织实施基础科研专项，加大资金投入，开展节能减排前沿技术的基础研究，通过共性基础技术平台建设和组织实施，为自主创新产品开发奠定基础，实施中国内燃机工业发展战略的第二步。

协同配套整机产品的发展要求，在内燃机节能减排前沿技术领域取得重大突破，占领制高点。全行业整体竞争实力进入全球内燃机制造工业的第一阵营，建成全球领先的技术体系和产业体系。实现世界制造强国目标，综合实力进入世界制造强国前列，实现中国内燃机工业发展三步走发展战略。

5.5 产业转型升级目标

“十三五”期间，继续巩固内燃机制造大国的地位，实现产品生产制造智能化，推动行业提升信息化，在核心技术、关键基础零部件、先进制造工艺和新材料应用上缩短与国际先进水平的差距。提升我国内燃机产业在全球产业分工和价值链中的地位。

5.5.1 基本要素

落实《内燃机行业规范条例》，规范企业独立法人资格。企业应符合国家法律、法规、有关规章和国家产业政策、宏观调控政策的规定。企业具有满足生产所需的生产场地和基础设施、存储场地及库房，适应产品生产的物流系统。企业具有产品设计开发能力、产品生产制造加工能力、产品生产一致性和质量控制能力、产品销售和售后服务能力。企业应保证生产所需的生产加工设备（含在线检测器具）、工艺装备、整机装配、试验台架和检验检测器具，其性能和精度必须满足

生产合格产品的要求。鼓励采用先进的智能化、数字化制造装备，优化生产工艺，保证产品生产一致性和可靠性。

此外，内燃机生产企业还必须具备以下条件：

1）完善的检测手段和检测仪器设备，至少包括：性能试验台、排放试验台、可靠性试验台、外协配套件进货检验条件和制度。

2）健全的设计研发机构。研发机构应有固定的办公场所，支撑研发所需的各类软件和硬件。能够开展整机及零部件研发，熟悉国内外技术标准和法规，具备产品的试验验证能力。

3）研发机构专职在岗技术人员不得少于员工总数的 5%。内燃机整机制造企业研发机构固定资产投资（含研发购买的技术费用）不得少于 1 亿元，燃油喷射系统、增压系统、后处理装置制造企业不少于 5000 万元。企业每年用于产品研发和工艺改进的费用应大于总销售额的 3%。

4）生产制造企业应具有产学研合作机制、产学研人才培养计划；具有省级部门认定的企业技术中心、工程研究中心、重点实验室等研发机构。鼓励建立国家级企业技术中心、国家级企业工程实验室、企业博士后工作站，确保实现自主创新技术和导入新技术渠道的畅通。

5）制造企业应建立专利发明、科技创新、工艺创新、能效创新、科学管理创新等奖励机制，完善建立全员创新体系，建立健全企业自主知识产权体系和信息化管理体系。

5.5.2 保障条件

掌握核心制造技术和关键工艺技术，建设 8 ～ 10 个共性基础技术平台，推动内燃机节能减排先进技术研发和科技成果转化。全面实施智能化改造，完成绿色制造体系建设。

全面贯彻执行国家机动车和内燃机排放法规，实施内燃机产品燃油消耗率公告制度，建立“领跑者”激励机制，实现节能环保型内燃机产品广泛应用。

加快内燃机再制造产业发展。推广替代燃料内燃机应用，实现内燃机燃料多元化。

5.5.3 发展途径

1）提高内燃机行业创新能力。形成企业为主体、市场为导向、政产学研用相结合的创新团体，开展关键核心技术攻关，加速科技成果产业化，提升内燃机行业创新能力。

2）强化基础能力建设。坚持内燃机工业强基工程的组织实施，以提升产业链整体水平、加强基础领域研发创新、推动产用互动、强化关键零部件的研发能力和制造水平为目标，在内燃机关键基础材料、核心基础零部件（元器件）、先进基础工艺、产业技术基础领域，实施工业强基工程，实现关键材料、核心零部件、整机、系统的协调发展。

3）加强质量品牌建设。提升质量控制技术，完善质量管理机制，夯实质量发展基础，优化质量发展环境，鼓励企业追求卓越品质，形成具有自主知识产权的中国创造品牌产品。推广先进质量管理方法的应用。

4）全面推行绿色制造。加速实现内燃机先进制造，综合考虑环境影响和资源使用效率，全面提升清洁高效铸造、锻压、表面处理、切削等加工工艺水平，推广采用先进成型加工方法、在线检测、智能化生产，实现绿色生产。

5）深入推进产业结构调整。大力推进企业技术改造，确定支持战略性重大项目实施技术改造的指南和目标要求，建立支持企业技术改造的长效机制。支持高端产品、关键零部件、基础工艺和原材料进行技术改造。加强行业规范和管理，支持企业间战略合作和跨行业、跨区域兼并重组，优化产业结构，促进产业集约集聚。提高规模化、集约化经营水平，培育一批核心竞争力强的企业集团。

6）推进企业国际化。实行积极的开放战略，将引进来与走出去相结合，推动内燃机企业国际化布局，拓展新的发展领域和空间。

7）完善网络化服务体系建设。以互联网管理为手段，建立布局合理、快速高效的服务网络，促进企业信息化在服务系统的深入应用。

5.6 产品目标

巩固内燃机制造大国的地位，实现产品生产制造智能化，推动行业提升信息化水平，在核心技术、关键基础零部件、先进制造工艺和新材料应用上缩短与国际先进水平的差距，有效地提高产品质量和生产一致性。

节能型发动机产品占全社会发动机产品保有量的 60%，与 2010 年相比，发动机燃油消耗率降低 6% ～ 10%，实现节约商品燃油 2 000 万 t，减少 CO_2 排放 6 200 万 t，减少氮氧化物排放 10%，采用替代燃料节约商品燃油 1 500 万 t；实现高效节能环保型发动机主机及其零部件生产制造装备的国产化、大型化；建立内燃机产品节能减排政策法规和标准体系。

1. 乘用车用发动机

汽油机将重点推广应用增压直喷技术，掌握燃烧和电子控制等核心技术，开

发直喷燃油系统、增压器等关键零部件，鼓励 2.0L 以下排量特别是 1.6L 以下小排量汽油机采用增压和直喷技术，推广轻量化技术及燃油与天然气双燃料技术。加快缸内直喷燃油系统在车用汽油机上的推广应用，重点推进缸内直喷汽油机燃烧系统及其高压喷油器总成等关键部件的生产制造，开展燃油喷射泵、电控喷油器等关键零部件制造工艺和加工设备技术改造。

柴油机将重点推动提高整机热效率，推广应用电控高压燃油喷射系统、高效增压中冷系统、排气后处理系统以及电子控制技术，鼓励发展乘用车用柴油机电控高压燃油喷射系统、高效增压中冷及排气后处理系统。加快高压燃油喷射系统在车用柴油机上的推广应用，加强电子控制系统、高动态响应执行器和超高压运动偶件关键制造技术和工艺研发，开展先进制造工艺和加工装备技术改造。

2. 轻型商用车柴油机

重点推广应用高压共轨、电控单体泵等先进燃油喷射系统，加快增压技术的应用普及，掌握整车标定和匹配技术。微型车用柴油机，加快推广应用高压共轨燃油喷射系统、高效燃油滤清系统和增压系统，提高燃油经济性和可靠性。推广应用小缸径多缸柴油机，重点研发缸径小于 80mm 的多缸柴油机电控高压燃油喷射系统制造技术、微型车用燃油供应系统关键部件及排气后处理装置制造技术。

3. 中重型商用车用柴油机

加快高效涡轮增压、余热利用、动力涡轮等技术应用。加强内燃机机械效率提高技术的研发和应用，重点开展低摩擦技术的开发应用，推进智能化、模块化部件的产业化应用，实现部件的合理配置和动力总成的优化匹配。

在满足欧Ⅵ排放前提下，重型发动机最低燃油消耗率达到 180g/kW·h，升扭矩 200N·m/L，升质量 80kg/L，1m 噪声 92d（B）a，换油周期达到 15 万 km，B10 寿命达到 180 万 km。

4. 非道路移动机械用柴油机

加强工程机械、农业机械、渔业船舶、排灌机械、发电机组等非道路移动机械用柴油机与配套装置之间的优化匹配，大力推广应用增压及增压中冷技术，推动以高效节能多缸小缸径直喷柴油机替代单缸大缸径柴油机。

建立小缸径多缸柴油机正向、优化创新设计体系。开展小缸径柴油机直喷燃烧系统、配气系统、增压器、后处理等关键件的优化设计、制造与工艺应用研究，建成小微型燃油喷射系统、增压系统、后处理系统研发体系，解决产品生产制造一致性和使用可靠性关键技术问题，形成小缸径多缸柴油机的生产制造体系。

建立非道路移动机械用柴油机配套标定体系。开展小轮径增压器与 2 ～ 3 缸柴油机优化匹配，开展高压燃油喷射系统匹配标定，开展小型后处理装置的匹配应用，建立标定数据库和适应不同配套对象的标准化标定程序模块，实现配套多功能型（微型）乘用车和农业机械优化匹配标定和应用。

对于非道路柴油机，排放达到国家非道路国Ⅲ标准，噪声、振动等指标达到国家相关标准，能耗降低 15%。

5. 船用柴油机

重点推进船用中速柴油机电控燃油喷射系统、智能化控制技术、高压比增压器、柴油 / 天然气双燃料内燃机、废气再循环技术等先进设备和技术的应用，推进船用低速柴油机动力系统余热回收利用技术、低速低负荷工况下燃用重油技术、柴电混合动力系统先进技术、选择性催化还原系统的应用。重点推动大型集装箱船、散货船和油船推广应用船舶柴油机机内净化、排气余热梯级利用及后处理技术，加强设备、系统优化组合和智能控制。开展柴油机、动力系统及节能减排设备的优化匹配技术研究。重点解决国产船舶柴油机的机内高效燃烧、余热利用、排气后处理系统等匹配优化，建立数据库和相关标准。

船用高速机，爆发压力高于 20MPa；强化系数最高可达 33MPa • m/s；最低燃油消耗率低于 190g/（kW • h），机油消耗率≤ 0.15g/（kW • h）；排放满足 IMO Tier Ⅲ / EPA 4 或更高要求。

6. 通用小型汽油机及摩托车用汽油机

重点开展二冲程汽油机多气流协调导向性高速扫气道等先进技术产业化应用研究，加快推广四冲程汽油机应用空燃比精确可控的电控技术，加强通用小型汽油机及摩托车用汽油机高效传动和动力匹配、性能优化和排气后处理技术的研发和应用。

7. 替代燃料内燃机

开展天然气单一燃料及天然气 / 柴油双燃料燃烧技术在车船用发动机上的推广应用，汽油 / 甲醇双燃料燃烧技术在乘用车用汽油机上的应用，柴油 / 甲醇双燃料燃烧技术在载重车、船舶、机车、固定柴油发电机组用重型柴油机上的应用，提高燃料供应系统关键零部件的耐腐蚀性和可靠性。

建立替代燃料内燃机正向创新设计和制造体系。开展天然气内燃机耐高温、抗热腐蚀气门、气体流量精确计量关键技术应用研究，建立天然气内燃机制造体系。开展甲醇 / 汽油、甲醇 / 柴油双燃料内燃机抗腐蚀、耐老化关键技术应用研究，解决甲醇供醇系统关键零部件生产制造及工艺问题，建立甲醇内燃机制造体

系。开展替代燃料内燃机匹配标定应用。开展商用车、工程机械、农业机械、船舶、铁路机车以及固定动力装置用替代燃料内燃机匹配标定，协同解决替代燃料内燃机燃料系统、增压系统、控制系统和排气后处理装置匹配标定技术和应用，建立标定数据库和适应不同配套对象的标准化标定程序模块。研发标定专用设备，编制标定技术相关标准。

推广适于替代燃料内燃机专用润滑油和非常规排放后处理技术，开展新型替代燃料燃烧技术研究。加强替代燃料发动机与现有发动机制造体系兼容。

8. 混合动力发动机

（1）插电式混合动力　混合动力新型发动机技术对标：混合动力整机结构及燃烧系统、冷却系统、润滑系统、进排气系统等关键系统解析；混合动力发动机瞬态和稳态性能对标测试；控制策略解析及对标，整机对标数据库的建立。

混合动力用新型发动机设计开发：集成应用电动可变正时、低功耗附件、排气净化等先进技术和零部件，开发发动机整机、燃烧系统、冷却系统、润滑系统和进排气系统。

混合动力发动机控制系统开发：高性价比、高可靠性发动机控制器硬件开发；开发发动机燃烧过程状态控制、喷射控制、转矩控制、动态控制、启动控制及排放控制等控制策略及软件；开展混合动力发动机台架标定试验，持续提升发动机系统性能。

混合动力整车集成与试验：发动机与混合动力总成集成开发、悬置系统开发、总成减振降噪技术研究；混合动力整车开发与样车试制；与混合动力总成集成后的台架试验标定与性能优化；混合动力整车试制与试验。

掌握混合动力发动机及其控制系统的开发技术，面向插电式汽车应用特点，开发功率密度高、高效区宽的增压直喷发动机和使用工况相对窄、热效率高、比油耗低的阿特金森循环发动机。乘用车用混合动力发动机，发动机热效率≥ 40%，搭载整车排放达到国Ⅴ标准；搭载整车，百公里综合油耗≤ 1.3L；商用车用混合动力发动机，发动机热效率≥ 45%，搭载整车排放达到国Ⅵ标准；搭载整车（以12m 客车为例，中国典型城市工况），混合动力模式下油耗≤ 16L/100km。

（2）增程式电动汽车发电用发动机　高效节能发动机及控制系统开发：研究发动机结构优化、燃烧优化、低功耗附件技术、排气净化等技术，开发体积小、热效率高、比油耗低的增程器专用发动机；针对增程器发动机的运行工况特点，开发增程器发动机专用控制系统，实现发动机特定区间的效率最大化。

对于增程式电动汽车发电用发动机，系统比功率≥ 0.65kW/kg；发动机比油耗≤ 220g/kW·h；搭载整车排放达到国Ⅴ标准；搭载增程式新能源汽车，燃油消耗量（不含电能转化的燃料消耗量）优于第三阶油耗限值比例≥ 40%。

5.7 配套目标

现代内燃机不仅要求自身性能优良，更承载了其终端配套对象节能减排等重要的功能，为了实现这些目标，使得内燃机的结构设计越来越复杂，集成化程度越来越高。因此，随着技术进步和社会专业分工的不断细化，单一的内燃机企业已经很难像以前一样，主要靠自身的资源，独立地完成整个产品目标。也就是说，作为内燃机企业将更多地去关注产品的整体设计和性能优化，以及关键的少数核心零部件的设计、制造，而绝大多数的功能部件和系统，则需要充分利用上游企业的专业技术、批量制造和过程控制能力，高质量的获得。从这个角度来说，内燃机产品的综合技术水平和竞争力，不仅取决于内燃机企业本身，更取决于上游供应链的综合实力，上游的零部件企业，不仅是内燃机企业的供应商，更是合作伙伴。

另一方面，内燃机作为一个中间产品，其性能最终的有效发挥，要通过搭载的下游产品予以体现。再好的内燃机产品没有与下游产品好的整合，都不能体现出它的优异，现在的内燃机产品与下游产品比任何时候都联系得更紧密。因此，应用工程能力，不仅是内燃机产品与下游产品结合的桥梁，更是最大限度发挥内燃机产品固有性能的关键。内燃机产品必须充分了解下游产品对自己的要求，并予以满足，下游产品必须了解内燃机产品的安装要求，并从设计的源头就作为重要的参与者。唯有同步地满足和协同，才能达到要求的目标。

随着全球排放法规的更加严格，节能减排，以及用户不断提高的期望值，内燃机产品作为中间产品已经很难独自完成如此复杂的技术、制造工作，必须与上下游产业链紧密合作，互相支持，利用各自的优势，才能在做好自身的同时，带动上下游产业链的共同进步。

优化上下游产业链。内燃机制造企业与产业链上游（材料、零部件供应商）和下游（配套机械）以及加工制造装备生产企业建立紧密的合作关系，形成协调协同和同步可持续发展机制，实现合作多赢，集中优势，同步发展的目标。

通过战略合作，内燃机整机生产企业与运动零部件、燃油、增压、电控、后处理及滤清等核心零部件供应商，建立由战略合作供应商组成的创新与发展“研发共同体”；与上游供应方企业建立“应用技术共同体”，开创与供应商、配套商合作研究的新模式，真正实现与供应商的协同创新、精益研发，形成我国内燃

机研发新的联动体系，认真做好以下方面的工作。

1．关键部件产业化

开展电控燃油喷射系统关键技术的研发和产业化应用，加强和改善喷油器总成、电控执行器、进油计量阀、电控单元的质量控制。

内燃机高效增压系统应用。建立高效增压器正向设计和制造体系。突破叶轮的腐蚀、轴承润滑与冷却、高效蜗壳等关键零件的制造和关键工艺，突破汽油机用增压器涡轮耐高温材料和特殊加工工艺，形成增压器创新设计和自主制造能力。开展增压器协同燃油系统、滤清系统、后处理系统与配套主机协同匹配标定。开展多级、可调增压技术与不同用途、不同燃料的内燃机协同匹配标定应用，建立标定数据库，形成增压器的自主开发能力。

建立完善高压燃油喷射系统创新研发和制造体系。突破喷油器总成、高速电磁阀、进油计量阀、轨压传感器和电控单元等关键部件正向设计和加工工艺研发环节瓶颈问题，形成系统创新设计和自主制造能力。开展高压燃油喷射系统和柴油机及其配套底盘匹配标定控制策略软件开发以及应用标定流程规范。建立柴油机应用高压燃油喷射技术标定数据库，建立标准化标定程序模块，研发标定专用设备，编制标定技术相关标准，掌握燃油喷射系统与燃烧系统、增压、排气后处理和热管理系统匹配标定技术。

提高增压器自主研发能力和制造水平，柴油机增压器应用可变几何截面增压、两级增压技术，汽油机增压器采用耐高温涡轮和电控放气阀及机械增压技术。提高高效选择性催化还原器、颗粒捕集器、废气再循环系统、三元催化和氧化催化转化器、在线诊断系统技术水平，强化产品一致性。

提高轨压传感器、宽域氧传感器、空气流量质量传感器等各类专用传感器的制造精度和质量水平，组织开发氮氧化物等用于排放控制的传感器。加强电控机油泵、电控冷却水泵研发和产业化建设，提高制造工艺水平并加大推广应用力度。开展运动组件结构优化设计，采用表面处理工艺技术，应用新材料，推广低摩擦技术应用。

加快高效增压系统在内燃机上的推广应用，重点掌握汽油机废气涡轮增压器材料和制造工艺、轻型车用柴油机可变截面增压器生产制造技术和中重型车用柴油机复合增压匹配标定等技术。

2．内燃机绿色制造

推广薄壁铸造、精密铸锻、热处理及表面加工等绿色制造工艺，实现内燃机

生产过程节能节材。鼓励企业在新产品开发和出厂试验环节使用具有高效能量回收功能的交流电力测功器，回收利用内燃机测试过程中产生的余热和电能。

3．内燃机产品再制造

按照内燃机产品再制造推进计划，积极开展内燃机产品再制造关键共性技术研发，优选再制造技术路线，完善再制造工艺流程，支持采用表面修复等关键技术，建立健全有利于旧件回收的市场体系，推广符合标准的内燃机再制造产品，鼓励对汽车、工程机械用发动机及其关键零部件开展再制造。

4．产品模块化及制造智能化

推广燃油喷射及滤清系统、增压及进气系统、冷却润滑系统、排气及后处理系统的模块化设计和协同控制技术。推动发动机及零部件生产过程智能化，推广采用先进加工中心、机器人、在线监测等设备的智能化生产线。

5．内燃机配件企业

内燃机配件企业要按照“市场导向、调整结构、科技创新、发挥优势，实现同步发展，参与国际分工”的发展战略，以市场为导向，以结构调整为重点，以科技创新为突破口，有所为，有所不为，扶优扶强，继续支持和鼓励一批具有比较优势和发展潜力的关键配件产品排头兵企业与国外有实力的厂家合作，围绕上品种、上水平、上效益，充分利用高新技术，提高产品开发能力，推动行业产品结构优化和产业升级，增强竞争实力，实现与主机同步发展，参与国际分工的目标。

配件企业应逐步形成产品自主开发能力，扭转长期依赖主机厂提供产品图样不能自主开发的被动局面。要充分利用大专院校、科研院所的力量，以行业排头兵企业或企业集团为主体，通过与国外联合开发，逐渐提高关键配件产品自主开发能力，提高企业市场应变能力，掌握发展的主动权，实现从消化吸收到等效替代、自主开发的根本性转变。充分利用信息化技术（CAD、CAE、CAM）提高产品开发水平，我国 CAE 水平近年有了很大提高，静态分析软硬件水平已经与国外水平接近，对应力、应变、位移、刚度和强度的分析比较成熟，可以充分模拟产品的使用环境，考核产品性能及可靠性，避免产品投产后才暴露出大量质量问题及设计缺陷，造成不必要的浪费，并影响新产品上市时间及市场信誉。同时，主机企业应该按照国际通行做法，分离出配件产品的设计工作，委托配件制造企业负责配套件的设计工作，以达到“双赢”的目的。

配件行业优势企业必须做大做强，实现规模经济。要彻底改变配件行业布局分散，规模小的不合理格局，以有条件的行业排头兵企业为主体，以系统产品为

龙头，以资本为纽带，优势互补，实现配件企业的联合与重组。逐步形成一批行业“小巨人”企业，2～3家行业龙头企业的市场份额应占80%以上。同时，要合理分工，正确引导有条件的中小配件企业，逐步形成分工明确的纵向多层次有机整体，共同支撑主机业的健康发展。

配件企业要改变发展滞后的被动局面，实现与主机同步发展，参与国际分工。配件企业要提高产品的市场竞争力，及时满足主机配套的需求。同时，要形成我国配件行业自身特色，力争适应全球采购的需求，参与国际分工，成为国际配件市场的重要组成部分。

5.8 市场服务目标

近40年来，中国内燃机产业的研发技术、制造技术、产品的可靠性和品种、数量等出现了爆发式的增长，全社会内燃机保有量突破了4亿台，为国民经济的发展做出了巨大贡献。

内燃机的市场服务体系建设和有效服务就显得特别重要。就目前的情况来看，我国内燃机及其零部件企业的市场服务理念、体系建设、服务水平等存在参差不齐的现象，法规法律体系的建设才刚刚开始，人才培养机制的建立，艰难前行，要想从一个制造大国到服务型制造大国，还有艰难的路要走。

《中国制造2025》的“战略任务和重点”明确地提出要积极发展服务型制造和生产性服务业的目标，为内燃机行业建立科学、完整、合理、全覆盖的市场服务体系指明了方向。

5.8.1 市场服务的概念

市场服务就是需要产品的制造者从产品的研发、客户推介、产品销售和售后服务直到该产品报废而围绕该产品开展的全过程的服务工作。

对内燃机及其零部件企业而言，市场服务包含了对于主机客户的售前、售中、售后服务和对于终端客户的维修保养和零部件提供。图5-1是市场服务框图。

图5-1 市场服务框图

售前服务包括：深入地同客户交流，准确了解客户对于产品的要求和匹配的要求，提出多个解决方案，供客户选择。

售中服务包括：进入开发进程后，需要联系客户的采购和品质部门，深入地了解客户的商务规则（价格、交付、赔偿、付款等）和详细的品质要求（运输标识、辨识细则、检验规则等），然后进行内部评估，以期满足客户的全面要求。

售后服务包括：从样件交付开始，技术服务人员应该全程跟踪客户的装机和试验情况，深入实验室和车间，做好服务工作，直到批产开始；客户的产品进入终端市场后，客服人员接收和处理市场信息，对于出现的质量问题，在12 ～ 24h 到场解决；必要时，可以应客户要求，进行客户服务人员的培训。

面对终端客户的维护保养，一定要编制图文并茂的、详细的产品手册，提出来结构、性能、安全事项、维修更换方法，以及各种联系信息等。

5.8.2 市场服务现状

从内燃机的应用领域出发，我国内燃机市场基本可划分为：道路行走机械，非道路动力装置和通机三大类，在这个大的类别下，还可以有乘用车、商用车、工程机械、农用车、摩托车、船机和通机等。而市场服务的类型也基本可以分为主机服务和独立售后服务两大类；

1．乘用车内燃机

中国的乘用车产业是以上海大众汽车厂的建立为标志才真正意义上建立起来，近三十年来，中国的乘用车产业总体上是以合资或独资企业为主的产业集群。在这些企业建立的同时，就建立起了具有世界先进水平的市场服务体系。从市场需求的调研，产品售前推介，售中技术指导，售后 4S 店的建设，维修人员的培训，备件的供应，保险理赔等方面，建立起了一整套行之有效的市场服务体系，确保客户无后顾之忧。有了整车的带动和示范，相关配套的内燃机及其零部件企业也在主机市场秉承售前、售中和售后的服务模式

2．商用车内燃机

我国的商用车市场服务体系的建设落后于乘用车市场的服务体系建设。市场的服务网点少，规模小，配件杂乱，标准化等方面不足，给客户带来很多不便。相对于乘用车的 25 000 家 4S 店，全国主要 8 家商用车制造商的 4S 店（含有纯维修站）总共才 8 千多家。

3．农用内燃机

农用内燃机的保有量很大，用户分散，维护保养水平偏低，厂家市场服

务成本很高。在计划经济年代，各县都有农机站，各乡都有农机所，能够基本上满足农机的售后维修需求。现在这套服务体系已经基本不复存在，而新的服务体系还没有有效地建立起来，农用内燃机市场服务和客户需求有巨大的差距。

4. 工程机械内燃机

工程机械产品相对于汽车，其特点是货值高，保有量小，专业性强，工作的区域偏僻、分散，环境恶劣和作业强度大。这样带来的售后市场服务就跟汽车产品有较大的差异，一般来说是签约服务商来进行专业的服务，也有很多是自己培养专业的维修人员来进行日常的维修保养。

5．其他内燃机

摩托车市场量很大，但是，集中度不高，维修相对简单，以小型维修店为主进行维护保养。

船用内燃机 —— 基于其特定的工作环境，整体的维护保养是依靠用户自己来进行或者在码头集散地有专业的服务人员进行服务。

通机市场 —— 以自己维护保养为主，有些小型通机（如园林机械），甚至不进行维修。

固定使用的发电机组 —— 主要是用户自己保养、维修，遇到比较大的问题，才寻求专业人员帮助。

5.8.3 内燃机市场服务差距

我国的内燃机市场服务与发达国家相比，存在较大的差距，表现在：

1. 服务意识不够

内燃机制造企业，重视销售，售前、售中和售后服务的意识不够。从制造商到服务商，没有真正地建立起来“客户就是上帝”的理念，没有准确地与客户进行技术交流，讲清楚每一个使用技术细节，让客户清楚知道技术要领。没有很好地规划市场服务目标和网点布置，客户得不到及时有效的服务。产生上述问题的主要原因是：没有与上游供应商进行协同规划服务项目，零部件的问题主机厂无法解决；没有同下游客户进行十分密切的对接，对于产品出现的失效模式了解不够。

2．市场服务分析不够

内燃机及其零部件制造商，没有对产品的失效模式进行深入分析，没有进行有效的验证试验，积累数据库；没有分析产品的使用水平，使用地的环境和气候条件，没有研究前期分析中的不足之处；没有研究客户区域维修服务人员的水平，

使用者对于产品的认知和受教育水平，产品保有量，使用地的经济发展水平等，没有制定出有效合理的服务方案。主机的售前、售中和售后以及培训等数据的分析不够。

3. 服务联动较差

内燃机制造企业，零部件企业和整车厂难以联动地、主动地进行相关市场服务，发现问题后，采用被动的联动服务方式，简单地推给上游企业等，耽误了客户的时间，影响了制造企业的市场信誉。

4. 集约化与人员技术水平偏低

我国内燃机维修企业分散，水平低，规模小且各自为政。应用工程师和合格技师的技术水平偏低，在产品销售之前，没有很好地对客户进行培训，让客户正确地使用和保养产品；在产品销售之后，在维修服务的实施上面，存在着技术水平低，诊断、维修不到位现象。

5.8.4 内燃机市场服务目标

内燃机行业在市场服务的意识、态度、能力、覆盖面和协同能力方面，以及我国的法律法规的建设，建设服务型企业的概念等方面，距离发达国家还有一定的差距。围绕国内外的市场需要，我们需要在以下方面，站在战略的高度来认识这个问题，做好产业协同，做好售前、售中、售后的匹配应用服务，做好终端客户的贴身服务和充足有效、价格合理的零部件供给，把建立服务型企业作为企业转型升级的突破口。

1. 乘用车和商用车

1）完善政策、法规文件或者行业标准，规范市场服务。

2）建立制造企业的服务标准，各省至少设立一个办事处，“主任 + 配件经理 + 服务经理”模式。

3）建立服务企业或者维修企业的工作标准，实行企业星级分类制和人员基本配置标准，实行包含“经理 + 机械技师 + 电器技师 + 综合培训师”的最低人员配置；持证上岗。

4）根据不同的岗位需求，建立维修服务人员应知应会考核体系，施行资质管理；建立服务企业的工作流程和维修服务质保条例。

5）施行维修零部件供应的专业化和集约化，最大限度消灭假冒产品滋生的空间；停产整机的零部件供应至少要保证 10 年。在一定的区域内（省内或者更大范围）扩展业务，实现多家代理，规模化、连锁化经营。

6）行业协会牵头，建立各个大的维修企业的网络化覆盖，小的企业可以加盟，形成一个完整的服务保证网络。可以由行业协会牵头，组织内燃机上下游企业，组成“专业服务联盟”，指导服务网点有效地开展工作。

2. 农用内燃机市场

1）全国每一个县级政府应该建立县级内燃机中心维修服务站，每一个乡镇建立服务分支，每一个村有一个服务点，形成一个合理的网络体系。

2） 按照市场经济规律，积极扶持在县域或者更大的地方出现的农业机械租赁企业或者农机合作社，集中采购、维修，让制造商的服务对象更加集中，更加有效，成本更低。

3） 内燃机或者整车制造企业，应该结合农业用途的产品特点，充分分析，制定出更加快捷，更加便宜的服务方案，深入基层，做好培训工作。

3. 其他市场

（1） 针对工程机械市场

1）每一个工程机械内燃机制造商，都要主动地联系上下游企业，建立专业队伍，进行有效的专业培训，编制好每一个机型的说明书，在销售环节就要让客户明白基本操作规范和保养知识。

2）近期目标是提高和改善现行的 4S 店和专营维修店的服务意识和服务水平，确定操作作业标准，确保市场的需求得到及时满足。

3）中期目标是逐步建立起地级市或者重要的建设基地中心服务站，每个站配备 5 人左右的高级工，发挥他们的核心作用和辐射能力。

4）远期目标是，全国优秀的服务 4S 站或者维修企业，成为工程机械制造商的战略合作伙伴，发展成大型企业或者企业集团，下辖若干个中心站、维修点，同时利用互联网进行远程服务和诊断，全方位、全天候地服务于客户。

（2）船用、通机、发电机组等内燃机

1）制造厂家首先要根据使用条件和客户的维护保养水平，制定合适的保养维修说明书。

2）要把备件供应放在非常重要的位置，因为这些产品的备件品种多、数量少，相对流转缓慢，使用地域相对分散。

3）在每一个客户处，至少培训两名维修人员（机电各一人），让他们掌握一般问题的处理方法，同时建立远程诊断平台，发现问题，及时诊断，及时供应配件，确保客户的需求能及时得到满足。

第 6 章

创新体系建设

内燃机作为国家新兴战略产业，经过几十年的建设，已经初步形成了具有我国特色的内燃机技术创新体系，实现内燃机的节能减排，必须进一步依靠技术进步，技术进步的灵魂就是创新，为进一步贯彻落实国家“十三五”创新发展提出的目标，实现内燃机的技术进步，必须进一步完善技术创新体系。

6.1 产业研发基地建设

6.1.1 创新平台概述

通过几十年的建设，我国目前已经基本形成了以企业为主体、市场为导向、科技基础前沿知识和技术创新支持、产学研用金协同创新并受到市场和需求检验的内燃机技术创新体系。这一创新体系的建立为内燃机产业和学科的发展发挥重要的支撑作用。该体系在科研层次上包括了直接面向市场的企业、企业的技术和工程中心、国家级和省部级技术中心，应用基础研究平台有国家重点实验室和产业创新联盟，构成了关键技术研究平台和新产品开发平台。在此基础上为产品开发提供了重要的技术支持基础，为零部件、整机建立了协同创新平台。

6.1.2 基础研究平台

在内燃机的技术创新体系中，国家重点实验室在基础研究中发挥了重要作用，并为创新体制起到重要的平台作用。以国家重点实验室为代表、瞄准内燃机学科国际前沿以及重大基础和科学问题、在内燃机领域起到开拓和引领作用的技术创新平台，主要研究内容涉及内燃机基础学科领域在内燃机中的应用，如燃烧学、结构力学、气液流动、射流与喷雾特性、化学反应动力学等，在这些相关学科中针对内燃机中的具体特点开展机理性和规律性的研究工作。目前我国内燃机行业已经建有“内燃机燃烧学国家重点实验室”和“内燃机可靠性国家重点实验室”。

1. 内燃机燃烧学国家重点实验室

内燃机燃烧学国家重点实验室于 1986 年经当时的国家计委批准开始建设，1989 年建成并对外开放，依托于天津大学。是我国内燃机领域唯一开展内燃机燃烧学基础研究的国家重点实验室。

内燃机燃烧学国家重点实验室以国家“能源、环境”战略需求为目标，瞄准

内燃动力学科国际前沿，依托天津大学动力机械及工程、力学、化学工程、自动控制等多学科交叉研究平台，围绕燃料及燃料燃烧、内燃机燃烧过程及其优化控制、内燃机有害排放物的生成及其对大气环境的影响以及后处理技术、内燃机节能新技术及低碳动力装置、动力机械结构强度、振动、噪声及润滑技术等问题，开展基础理论、新技术创新以及填补国家空白的系统集成创新的研究，在我国内燃机动力工程领域发挥着“开拓和牵引”作用。

通过二十余年的建设，实验室聚集了一支由国内外知名专家为学术带头人的科研团队，已成为装备先进、在国内外有重要影响的高水平科学研究和高层次人才培养的基地，是我国内燃机动力工程领域重要的创新研发中心。实验室共设立五个研究方向：①燃料与燃料燃烧基础理论研究，重点开展包括生物质燃料在内的替代燃料、合成燃料的制备与理化特性评价，并研究各种燃料的高效清洁燃烧理论及燃料燃烧反应动力学，同时开展特殊发动机的燃烧基础理论方面的研究。②内燃机燃烧过程及其优化控制的研究，围绕突破传统内燃机的两个极限（燃料利用率和排气污染），对进一步提高内燃机的热效率，实现内燃机的零排放进行深入的理论和应用研究。同时，还开展高效清洁内燃机燃烧过程全历程浓度、温度和混合气成分控制技术及内燃机瞬变工况燃烧边界条件控制技术、控制策略的研究。③内燃机有害排放物的生成过程、有害排放物对大气环境的影响及后处理技术的研究，着重开展内燃机有害排放物的生成机理和控制，内燃机有害排放物对大气环境和人类的危害及排气后处理技术的研究。为我国内燃机实现低排放、超低排放直至零排放提供理论和技术支撑，为国家制定有关环保法规提供依据。④内燃机节能新技术及低碳动力装置的研究，着重开展废弃余热利用、新型热力循环、内燃机强化传热等内燃机节能新技术研究；开展混合动力汽车技术研究；开展电动汽车、车用动力电池等新型动力的研究。⑤动力机械结构强度、振动、噪声及润滑技术的研究，围绕内燃动力机械和装置开展内燃机优化设计理论和技术、低噪声内燃动力技术以及润滑机理和润滑油品设计等理论和技术问题的研究。

内燃机燃烧学国家重点实验室研究人员力量雄厚，有固定人员 51 名，其中教授 28 名，副教授 16 名，讲师 2 名。其中包括：中国工程院院士 2 名、国家千人计划特聘专家 1 名、“973”首席科学家 3 名、国家杰出青年基金获得者 3 名、新世纪百千万人才工程国家级人选 1 名和教育部新世纪优秀人才 7 名。

内燃机燃烧学国家重点实验室建有下列用于开展创新研究的专业实验室：柴

油机均质压燃低温燃烧实验室、复合激光诱导荧光实验室、整车排放检测室、发动机动态试验室、绿色能源研究室、燃烧化学研究室。实验室设立开放基金。该基金主要用于资助与本实验室研究方向有关的课题，以鼓励和促进内燃机学科的发展与进步，同时也更好地利用重点实验室的仪器设备等资源。

开放课题重点资助领域包括：内燃机燃烧理论，内燃机节能新理论、新技术，内燃机有害排放生成、环境行为及控制，内燃机代用燃料，内燃机振动、噪声，内燃机控制。

内燃机燃烧学国家重点实验室建立以来取得了一系列重大科研成果，获得国家技术发明奖 2 项，分别是“柴油机复合式燃烧技术”和“柴油机混合率与化学反应率协同控制技术及应用”。获得了数十项省部级奖励。研究成果为内燃机的节能减排，为行业和学科的发展做出了突出的贡献。

2. 内燃机可靠性国家重点实验室

内燃机可靠性国家重点实验室建于 2009 年 1 月，依托于潍柴动力股份有限公司。针对我国内燃机与国外先进内燃机在可靠性方面的主要差距和关键制约，该实验室以内燃机整机可靠性研究、关键零部件可靠性研究为主要方向，通过开展基于可靠性目标的验证方法研究，建立目标导向的内燃机可靠性开发与验证过程，形成国际领先的内燃机整机可靠性研究能力，搭建起能够支撑整机可靠性提升的关键零部件可靠性研究平台，实现我国在内燃机可靠性理论和方法体系方面的突破性创新，赶超和引领先进内燃机可靠性的技术发展。

该实验室的建立能够加速突破影响我国内燃机及相关配套产品国际竞争力的关键瓶颈，为我国实现节能减排目标提供有效的技术支持，为推动内燃机及相关配套行业技术进步提供基础平台，为两型社会建设和可持续发展提供可靠保证。

内燃机可靠性国家重点实验室通过了中国合格评定国家委员会（CNAS）认可和德国 TÜV 的认可，同时也是国际实验室认可组织（ilac-MRA）的签约成员。是国内功能最全、能力最强的内燃机可靠性实验室，在内燃机可靠性研究方面处于国内领先水平。

以内燃机可靠性国家重点实验室为依托，牵头成立了内燃机可靠性国际技术创新联盟，联合美国麻省理工学院、威斯康星大学、德国亚琛工业大学、美国西南研究院、清华大学、浙江大学等 19 家国内外知名专业研究机构，深入开展技

术研究与合作。该创新联盟每年召开内燃机可靠性技术国际研讨会，通过该研讨会的学术交流使国内的内燃机可靠性研究人员了解国际发展动态和前沿热点，把握内燃机可靠性研究的方向，指导我国内燃机可靠性研究的发展，推动行业的技术进步。

牵头成立了全国内燃机标准化技术委员会可靠性工作组，开展了内燃机关键零部件与整机、整车匹配等领域的可靠性研究，通过成果共享、制订和完善行业技术标准等，推动了内燃机可靠性及内燃机行业发展。

牵头成立了全国内燃机标准化技术委员会内燃机节能工作组，开展了内燃机节能领域国家标准制订、修订及研究，推动了内燃机节能及内燃机行业发展。

实验室现拥有一支 138 人的高素质、高水平、覆盖多学科的科技人才队伍。其中，固定人员 120 人，流动人员 18 人。固定人员中，引进海外高端人才 10 人，入选国家“千人计划”4 人，获聘山东省“泰山学者”7 人；拥有高级职称 50 人，约占 42%；拥有整机及零部件可靠性研究方向学术带头人 11 人。

实验室建有博士后流动工作站，开展了整机结构研究、电控系统可靠性研究等工作。实验室与天津大学、山东大学、中国海洋大学、吉林大学分别联合开办了动力工程、材料工程、机械工程、计算机技术、车辆工程、工业工程硕士班，培养各专业工程硕士 203 人。

近 5 年来，通过与国内外知名高校院所联合开展科研攻关，设立开放课题 49 项，投入经费 5 822 万元，为企业发展注入了活力，为行业培养了内燃机可靠性相关专业技术人才。

实验室相关试验研发资源面向产业链上下游客户实行开放服务，与 20 余家公司保持长期合作，在内燃机零部件方面进行可靠性研究。与 54 家具有自主研发实力的供应商成立了“潍柴动力产品研发共同体”，与 41 家上游供方企业建立了“潍柴动力应用技术共同体”，开创了与供应商、配套商合作研究的新模式，真正实现了与供应商的协同创新、精益研发，形成了我国内燃机研发新联动体系。

实验室取得了多项科研开发成果，其中荣获省部级以上科技奖励情况见表 6-1。

表 6-1 荣获省部级以上科技奖励情况

获奖成果名称	奖励名称及等级	获奖时间
重型高速柴油发动机关键技术及产业化	国家科技进步奖二等奖	2012.12
WP10/WP12 系列重型高速发动机及关键技术	中国机械工业科学技术奖特等奖	2011.11
重型商用车电控柴油机开发平台及蓝擎系列柴油机	山东省科技进步奖一等奖	2010.01
WP10/WP12 系列欧III柴油机	山东省科技进步奖三等奖	2008.04
WD61546 柴油机研制开发	山东省科技进步奖二等奖	2005.11
WD61546 柴油机研制开发	中国机械工业科学技术奖二等奖	2004.12
WD618 柴油机	中国机械工业科学技术奖二等奖	2002.12
先进柴油机共轨式电控燃油系统及其相关应用技术	天津市技术发明奖二等奖	2002.09

6.1.3 零部件研发平台

内燃机由大量的零部件组成，其中的关键零部件决定了内燃机的技术水平和性能。目前，内燃机行业的关键零部件关键技术，如供油系统、增压系统、后处理系统、电控系统等都掌握在国外研究机构和厂商手里，对我国内燃机技术的整体发展形成垄断甚至威胁。因此，急需突破和掌握内燃机零部件的关键技术，形成自主设计和自主创新的能力。零部件研发平台的作用是针对内燃机性能和技术指标有重要影响的关键零部件开展应用基础和关键技术攻关，为高性能的新产品开发提供技术支持和技术储备。

原机械工业的科研开发体系主要是由 64 个应用技术科研院所、17 所行业大专院校、14 个专业勘探设计研究院等组成，是以行政管理为纽带，以实现国家计划任务为目标的科技体系，虽然在历史上为机械工业的技术进步发挥了重要作用，但随着改革开放，已经不能适应新形势下机械工业发展的需求。更为重要的是随着政府机构和科研体制改革，行业科研院所转制后的主要力量都转向市场，以本单位的产业化为中心，因而机械工业的基础共性技术、关键技术的创新研发能力大为削弱，机械工业原有的行业科技工作体系结构被打破，原有的行业科技开发体系已不存在，迫切需要建立起新形势下的科技创新体系。同时，由于机械工业具有涵盖行业多、产品种类多、生产集中度低、大中型企业少、企业开发能力弱，特别是占 80% 以上的中小企业自主创新能力薄弱的特点，要提升整个机械工业的发展和振兴，也必须要建设一个具有较强科研开发能力、辐射能力和服务能力的“机械工业科技创新体系”。所以，建设一个新的机械工业科技创新体

系，承担促进机械工业科技发展的任务已是当务之急。

中国机械工业联合会于2007年制订并颁布了《机械工业工程（技术）研究中心管理办法》和《机械工业重点（工程）实验室管理办法》，启动了机械工业技术创新体系建设工作。机械工业技术创新体系建设工作自2007年启动至今已经历时8年，在各级科技主管部门的关心指导下，在行业的大力支持下，已形成了初步的框架，为下一步工作的深化打下了坚实的基础和创造了较好条件。机械工业科技创新体系建设工作得到了全行业的关注和支持，已批准建设的机械工业重点试验室和工程研究中心的依托单位，都把试验室和工程中心的建设工作作为提升自主创新能力建设的中心工作，加大投资力度，集中优势科技队伍，采取边建设、边运行的方式，正在逐步形成科研开发能力。已验收的机械工业重点试验室和工程研究中心已经初步形成研发能力和科技服务能力，并取得了一批高水平科研成果，对机械工业技术水平的提高发挥了积极的作用。

截至目前，共批准建设了涉及内燃机技术领域的工程研究中心和重点实验室15个，包括工程研究中心13个、重点（工程）实验室2个；其中8家已经通过验收并挂牌运行（表6-2）。机械工业联合会创新研究平台的特点是特别重视零部件领域创新研发平台的建设。

表6-2　机械工业联合会与内燃机相关的创新平台

序号	工程研究中心、重点实验室名称	依托单位	进展情况
1	机械工业内燃机工程研究中心	上海内燃机研究所	已验收挂牌
2	机械工业发动机电子控制技术工程研究中心	无锡油泵油嘴研究所	已验收挂牌
3	机械工业拖拉机工程研究中心	中国一拖集团有限公司	已验收挂牌
4	机械工业内燃机滑动轴承工程技术研究中心	恩比贝克飞虹汽车零部件（四川）有限公司	已验收挂牌
5	机械工业重型车及工程机械柴油机工程研究中心	潍柴动力股份有限公司	已验收挂牌
6	机械工业船用涡轮增压技术工程研究中心	重庆江增船舶重工有限公司	已验收挂牌
7	机械工业内燃机增压系统重点实验室	山东寿光康跃增压器有限公司	已验收挂牌
8	机械工业内燃机滑动轴承工程实验室	广州安达汽车零件有限公司	已验收挂牌

（续）

序号	工程研究中心、重点实验室名称	依托单位	进展情况
9	机械工业汽车发动机配气机构工程研究中心	济南沃德汽车零部件有限公司	第三批在建
10	机械工业发动机气门工程技术研究中心	广东怀集登云汽配股份有限公司	第三批在建
11	机械工业曲轴连杆工程技术研究中心	天润曲轴股份有限公司	第三批在建
12	机械工业高效环保柴油机工程技术研究中心	广西玉柴机器股份有限公司	第五批在建

6.1.4 工程技术中心体系

为贯彻落实《国务院办公厅关于加强内燃机工业节能减排的意见》国办发〔2013〕12 号文件提出的“加强企业技术研究中心能力建设，推动建设一批内燃机工业国家工程研究中心”的任务目标，机械工业联合会于 2013 年启动了内燃机工业工程（技术）研究中心建设工作，2014 年 1 月，中国机械工业联合会以中机联科〔2014〕26 号发文，正式核准了机械工业内燃机增压技术工程研究中心、机械工业内燃机振动测试技术工程研究中心、机械工业汽车动力总成电子控制工程技术研究中心、机械工业内燃机排气后处理工程技术研究中心、机械工业替代燃料内燃机工程技术研究中心等 5 个工程技术研究中心的建设方案。

1. 机械工业内燃机增压技术工程研究中心

依托并责成北京理工大学负责组织建设。中心主要研究方向：

（1）涡轮增压器内部流动特性与优化设计　针对涡轮增压器小尺寸高转速的特点，研究产生流动损失的因素和扩大流量范围技术手段，通过优化设计获得适应现代车辆内燃机不同匹配要求的涡轮特性和压气机特性，通过专机专配提高匹配性能，面向工程化和产业化开发新产品。

（2）涡轮增压器可靠性与振动噪声　针对苛刻的车辆运行条件对增压器的可靠性提出的更高要求，在材料、结构和系统匹配方面，运用结构分析和计算流体力学方法，对高速转子动力学特性、非定常流动导致的振动噪声问题开展研究工作，结合试验测试手段，寻求提高增压器可靠性和降低噪声的技术途径，为高性能涡轮增压器产品提供技术支持。

（3）涡轮增压器特性调节与控制　针对现代汽车的排放和燃油消耗法规的日趋严格，研究开发涡轮增压器灵活适应内燃机工况变化的调节技术，包括压气机流量范围和涡轮流量特性的调节技术，在实现调节功能的同时，保证效率的最大化，以适应更高排放法规和汽油机宽流量范围的产品需要。

（4）新型复杂增压系统　为了适应车用内燃机性能提高和采用各种新技术的要求，研发新型增压系统，包括二级增压、顺序增压、辅助增压等新技术和新装置；研究增压器之间的匹配关系以及增压器与进排气系统之间的高效匹配方法。

（5）涡轮增压器测试方法　针对涡轮增压器整机性能、可靠性和振动噪声等开展测试方法研究，针对涡轮增压器零部件的性能和可靠性开展测试方法和检测规范研究，自主开发测试设备和测试装置，为增压器的质量保证提供技术手段。

（6）涡轮增压器新材料与新工艺　为了适应高温、超高转速和动密封等苛刻工作条件，开展耐高温新材料及其铸造工艺、高强度轻质材料及其成形工艺和高精度加工工艺研究，开展产品质量保证和产品一致性研究。

2. 机械工业内燃机振动测试技术工程研究中心

依托并责成苏州东菱振动试验仪器有限公司负责组织建设。中心主要研究方向：

针对包括振动、冲击、碰撞、恒加速度、跌落、摇摆、颠簸等力学环境试验设备的研发及衍生产品的技术研发及产业，针对内燃机力学环境试验技术的新标准、新原理及新方法的课题研究与应用实践。主要在两个方向上开展研究工作：一是设备自身工作引起的振动，主要有：配气系统振动和缸套振动，它会影响气门的正常工作和缸套的性能，对内燃机的整个工作性能有很大影响；曲柄连杆机构的重力及其惯性力也是内燃机振动的重要因素，曲轴轴系会同时产生弯曲振动和扭转振动。弯曲振动会引起配套轴系和机体其他部件的振动，是内燃机的主要噪声源。对扭转振动在内燃机工作转速范围内容易产生共振，如不采取预防措施，轻则引起较大噪声、加剧其他零件的磨损，重则可使曲轴折断。因此，扭转振动是内燃机设计过程中必须考虑的重要因素。二是间接激振力和外界环境引起的振动：曲柄连杆机构产生的惯性力和力矩、活塞敲击、正时齿轮、气门系及燃油喷射系引起的整机振动，以及内燃机所处的环境，都会直接影响内燃机的使用寿命、工作效率和可靠性。

中心主要发展方向为：研究适用于各类用发动机以及各种代用燃料发动机的综合环境振动试验设备；研究适用于各类排放达到国家标准要求的工程机械用柴油机、汽油机及混合动力的综合环境振动试验设备；研究适用于大型船舶、地质

和石油钻机、国防工业配套的柴油机的综合环境振动试验设备；研究适用于先进内燃机配套零部件综合环境振动试验设备；研究适用于测试先进内燃机配套零部件材料特性的综合环境疲劳试验设备；研究并培养内燃机测试高端人才，提供内燃机的零部件及整机测试方案，失效分析及整体解决方案；研究并制定相关试验标准，建立最完善的标准文献检索查询网络和标准资料库，对外开展标准文献查询，现行有效性等咨询服务。

3. 机械工业汽车动力总成电子控制工程技术研究中心

依托并责成中国第一汽车股份有限公司技术中心负责组织建设。中心主要研究方向：

建立和完善动力总成电子控制技术创新平台、动力总成电子产品开发平台、测试与认证平台和制造技术平台。同时，组织实施动力总成电子控制关键技术研发，促进动力总成控制产品产业化进程。研究工作着力打造四个平台：

（1）动力总成电子控制技术创新平台　研究汽油机控制技术：涡轮增压控制技术、进排气可变正时控制技术、停缸控制技术、起停技术等。

研究柴油机控制技术：多次喷射控制技术、后处理 SCR、EGR 控制技术、增压器（VGT）控制技术、精确的轨压闭环控制技术、多模式自适应冷起动预热技术等。

研究天然气发动机控制技术：国Ⅵ燃烧与排放技术、天然气柴油双燃料技术、稀薄燃烧控制技术等。

研究商用车 AMT 变速器控制技术：复杂路况智能识别技术、气动换挡过程精确控制技术、动力总成协调控制技术等。

研究微型车 AMT 变速器控制技术：干式离合器扭矩精确控制技术、离合器表面温度估计技术、电机换挡过程精确控制技术等。

研究轿车 DCT 变速器控制技术：湿式离合器摩擦因数动态估计技术、预选档控制技术、双离合器快速切换控制技术等。

（2）动力总成电子产品开发平台　根据创新平台所获得的控制技术及其性能初样机成果，进行产品化开发，打造乘用车和商用车两个动力总成控制系统产品平台，形成一整套动力总成控制电子产品开发流程与体系，持续提高整车产品商品力。

（3）动力总成控制电子测试与认证平台　建立所必需测试仪器与实验装备，形成动力总成控制系统检测与认证依据，打造动力总成电子控制产品测试与认证公共平台，为长春、东北地区乃至全行业服务，力争纳入国家级的检测与认证体系，

并且力争获得国际标准化组织和认证组织的认可。

（4）动力总成控制产品制造技术平台　研究电子控制单元硬件生产制造工艺技术，提升汽车电子产品生产制造工艺和水平，提高产品生产制造的一致性和可靠性，打造汽车电子产品制造技术平台，建立汽车电子产品中试和生产基地。

建立汽车动力总成电子控制工程技术研究中心总目标是：提升自主创新能力；解决汽车动力总成电子产业核心技术“空心化”问题；汽车动力总成电子高层次人才培养基地；汽车动力总成电子行业的共性关键技术研发基地。

4. 机械工业内燃机排气后处理工程技术研究中心

依托并责成中国第一汽车股份有限公司技术中心负责组织建设。中心主要研究方向：

（1）开展国情研究，开展国家战略和产业需求研究，开展适合于中国国情的内燃机后处理工程技术策略的顶层设计。

（2）结合国家科技发展规划，进行中长期的内燃机排放净化后处理技术规划，制订具有中国特色的国Ⅴ、国Ⅵ技术路线图。

（3）跟踪国外先进技术，开展内燃机排放净化基础技术研究，开展热力学和动力学研究，借助于 CAE 设计平台进行优化。

（4）建立载体技术平台，研究新材料和新结构的载体，包括陶瓷蜂窝载体、挤压式带催化剂的陶瓷载体、金属蜂窝载体和金属复合纤维载体的技术。

（5）建立催化剂技术平台，研究低贵金属的氧化性催化剂、无贵金属的稀土钙钛矿型催化剂、分子筛催化剂技术。

（6）建立探测技术平台，研究低贵金属或稀土改性的高耐硫、高活性和长寿命的 NO_X 和 PM 传感器的技术。

（7）开展乘用车用后处理工程化研究，包括高效 DOC、CRT、NSR、高耐久性 DPF、小型化 SCR、小型化 SSCR 的关键技术。

（8）开展商用车用后处理工程化研究，包括高效 DOC、POC、CRT、NSR、高耐久性 DPF、高可靠性 SCR、SSCR 的关键技术。

（9）开展天然气车用后处理工程化研究，包括开发高效 TWC、DOC、CRT、高耐久性 DPF、SSCR 的关键技术。

（10）开展 NO_X 和 PM 传感器工程化研究，包括 NO_X 和 PM 气敏材料以及系统控制的关键技术，实现国内本领域的零的突破，打破国外技术和产品的垄断，实现工程化应用。

（11）建立封装技术平台，研究封装材料和封装工艺技术。

（12） 开展液体车用尿素和 SSCR 所用的 ECU、DCU 以及喷射计量单元的核心技术工程化研究。

（13）建立后处理技术相关的计算机网络平台，开展相关知识教育普及和技术推广，向行业提供服务。

（14）建立内燃机排放净化技术评测技术平台，健全先进检测能力和试验手段，向行业提供服务。

（15）建立材料工艺和试验方法标准体系平台，建立 SSCR 单元互换性标准体系，向行业提供服务。

5. 机械工业替代燃料内燃机工程技术研究中心

依托并责成天津大学负责组织建设。中心主要研究方向：工程中心将主要针对醇类（甲醇、乙醇、丁醇等）燃料、生物柴油等替代燃料在道路车辆和非道路移动机械领域的应用，重点围绕替代柴油开展工作。推动我国内燃机燃料的多元化，减轻对传统石油燃料的依赖。

6.1.5 整机研发平台

内燃机整机研发平台以基础研发平台的研究成果为牵引和依托，应用零部件研发平台的关键技术和高新技术产品，开发满足国家各阶段排放法规和燃油消耗法规的内燃机新产品，满足车辆、船舶、工程机械、农用机械和其他非道路机械的需求。

内燃机整机研发平台以国家和省部级的企业技术中心为主。我国大型汽车企业都建有国家级技术中心。下面以东风汽车公司技术中心为例介绍整机研发平台的情况：东风汽车公司技术中心（东风汽车工程研究院）的前身是二汽技术中心（1983 年 4 月 1 日建成）。东风汽车公司技术中心是东风汽车公司汽车新产品的重要研发部门，是国家发展改革委员会、财政部、税务总局、海关总署认定的国家级“企业技术中心”，是国家科技部认定的国家一类科研院所，国内汽车行业第一批国家级“海外高层次人才创新创业基地”，固定资产近 20 亿元人民币。多年来，东风汽车公司技术中心秉承“改进一代、开发一代、预研一代”的产品开发方针，在东风商用汽车、乘用汽车、军用越野汽车、清洁燃料汽车、混合动力汽车等汽车产品开发方面为东风汽车公司和中国汽车工业发展做出了重大贡献。

东风汽车公司技术中心，现有人员 1 700 余人，其中享有国务院政府特殊津

贴专家 5 人、国家“千人计划”9 人、研究员级高级工程师 53 人、高级工程师 225 人、博士 25 人、博士后流动站一个。下设乘用车商品研发院、军用车辆研发院、东风汽车技术研究院，包括造型部、整车部、车身部、动力总成部、电子电器部、底盘部、新能源汽车研究所、研究部和试验部等 20 个部门。

东风汽车公司技术中心动力总成部总人数为 224 人，总工程师 7 人，下设动力总成设计室、动力总成平台设计室、发动机系统设计室、发动机仿真分析室、发动机技术室、发动机试验室和发动机标定技术室，形成了产品正向设计、仿真、试验和整车匹配完整的研发体系。

6.1.6 协同创新平台

协同创新平台的作用是通过多家研究机构和企业的科研合作，研究解决产品竞争前的关键共性技术问题，参与研究的单位可共享研究成果，在各自的具体新产品开发中得到应用，这样可以合理利用全行业的资源，促进内燃机行业的技术进步和发展。协同创新平台的主要形式是产业技术创新战略联盟。在国家和省部级科技项目申报中有多家单位组成的联合体也是协同创新平台的一种补充。

1. 商用汽车与工程机械新能源动力系统产业技术创新战略联盟

商用汽车与工程机械新能源动力系统产业技术创新战略联盟是国家科技部于 2010 年 1 月正式批准成立的首批 56 个联盟之一、也是汽车产业迄今为止仅有的两个联盟之一。联盟由积极投身于商用汽车与工程机械新能源动力系统技术进步、从事相关技术与产品的研究、开发、生产、制造、服务的企业、科研单位和大专院校等相关机构自愿组成。

联盟坚持“政府引导，面向市场”的方针，以“引导产业发展、推动技术创新”为宗旨，实现“在政府相关政策引导下，促进实施产业共性技术的研发活动与技术扩散，推动共性技术应用”的目标。以多样化、多层次的自主研发与开放合作创新并存，建立行业产学研结合的技术创新体系，推动商用汽车与工程机械新能源动力系统自主创新能力的健康发展。

联盟探索在国家政策和资金引导下建立以企业为主体、市场为导向、产学研结合的产业技术创新机制。加强合作研发，以获得商用汽车与工程机械新能源动力系统共性和关键技术问题的重大突破。成为国家技术创新体系的重要组成部分，成为产学研结合的纽带和载体，成为技术创新资源的集成和共享主渠道，成为商用汽车与工程机械新能源动力系统战略、前沿、共性、关键技术的持续创新研发

平台，成为面向行业的技术辐射基地。

该创新联盟成员有：潍柴动力股份有限公司、同济大学、陕西法士特齿轮有限责任公司、上海燃料电池汽车动力系统有限公司、上海电驱动有限公司、吉林大学、北京理工大学、北京交通大学、山东大学、中国汽车工程研究院、上海大郡自动化系统有限责任公司、山推工程机械股份有限公司、陕西重型汽车有限公司、上海奥威科技开发有限公司、意昂神州（北京）科技有限公司。

2. 节能环保内燃机产业技术创新战略联盟

针对我国内燃机产业“节能减排”和“低碳排放”的战略需求，由天津大学内燃机燃烧学国家重点实验室和中国内燃机工业协会联合倡议，国内 9 个汽车及发动机的优势企业、7 所大学、4 个研究所以及行业协会等 21 个单位组建了“节能环保内燃机产业技术创新战略联盟”，这是迄今为止我国成立的众多产业技术创新联盟中唯一由高校牵头的联盟。

联盟针对我国内燃机产业“节能减排”和“低碳排放”的战略需求，整合内燃机优势产业资源以及领先的大学和研究所等创新资源，以满足日益严格的排放法规、油耗法规和降低 CO_2 排放为牵引，开展以高效清洁燃烧技术、控制技术、高功率密度与爆震燃烧等非竞争性关键共性技术攻关，突破燃油喷射系统、增压器、后处理器等产业发展技术瓶颈，实施技术转移，加速关键共性技术科技成果商业化运用，提高我国节能环保内燃机自主开发能力和技术创新成果的辐射能力，推动我国节能环保内燃机产业结构调整和升级。

6.1.7 创新平台的总体运行状况和建议

我国内燃机行业目前已有的技术创新平台运行状况良好。主要体现在研发目标明确，研究内容重点突出，取得了一系列的研究成果，支撑了高性能新产品的开发。但是还存在不足，主要体现在投入不足、布局不够完善和全面，特别是在研发能力和研发水平方面还有待提高。这其中在创新平台布局和研发资金投入上需要国家给予大力支持。

1. 研发水平的提高

建议国家充分重视内燃机在我国节能减排战略中的重要作用和地位，注意到内燃机在今后相当长一段历史时期内的不可替代性和不可或缺性，注意到内燃机的量大面广的应用特点和能源消耗总量巨大，把内燃机节能减排列入国家重大科研计划并给予倾斜。与此同时，支持和鼓励现有的创新平台进行升级改造，培育和改造一批零部件工程研究中心进入省部级或国家级重点实验室或工程中心行

列，进一步提高其研发能力和研发水平。

2. 完善创新平台布局

核心基础零部件（元器件）、先进基础工艺、关键基础材料和产业共性技术基础能力薄弱，是长期制约我国内燃机行业创新发展和质量提升的症结所在。现有的创新平台还不能完全覆盖上述基础能力，因此建议在下列急需和重要领域提升创新能力和平台建设水平。

（1）内燃机控制技术平台

1）建设目标。以在该领域骨干企业和上下游产业链优势企业为基础，搭建协同开发、协同标定、协同保障和服务的基础技术平台。

2）重点任务。数据库建设，编制压燃式内燃机 ECU、DCU、DPF 等控制模块的开放式应用软件，编制点燃式内燃机 ECU、GPF 等控制模块的开放式应用软件。

（2）内燃机动力总成技术平台

1）建设目标。集合内燃机和变速器骨干企业及科研院校，联合产品上下游产业链优势企业，搭建协同开发和优化设计、协同搭载标定和保障的动力总成平台。

2）重点任务。数据库建设。根据配套不同用途整车技术方案和搭载指标的要求，优化动力总成技术方案和匹配标定主要技术参数，紧密动力总成协同合作，实现搭载整车降低燃油消耗和控制有害物质排放为目的。

（3）内燃机排气后处理技术平台

1）建设目标。以在该领域骨干企业和上下游产业链优势企业为基础，搭建协同开发、协同标定、协同保障和服务的基础技术平台。

2）重点任务。数据库建设。选择性催化还原器 —— 以提高效率和优化结构参数为重点，完成系统内部接口协议互联互通基础标准规范工作。颗粒捕集器 —— 开发控制模块应用软件，对配套主机厂，开放应用软件接口，完成系统内部接口协议互联互通基础标准规范工作。

（4）内燃机低摩擦技术平台

1）建设目标。集合行业骨干企业，开展采用先进的表面处理工艺和新材料在往复、旋转摩擦运动组件应用，实现低摩擦技术产业化。

2）重点任务。数据库建设。往复旋转摩擦运动组件 —— 开展表面喷涂工艺和材料的基础研究，通过应用工程的研究和确立，推动产业化。变排量机油泵、电子冷却水泵 —— 采用电子控制技术，实现与主机控制单元的“对话”。优化

结构设计，研究新材料、新结构的加工工艺，实现低摩擦技术产业化应用。

（5）内燃机关键零部件测试技术、智能设备及数据库技术平台

1）建设目标。集合内燃机行业优势企业，采用政产学研用模式，开发内燃机和关键零部件研发、工程制造专用测试及可靠性试验设备，研究内燃机及关键零部件的测试技术，建立数据库。

2）重点任务。开展内燃机排气后处理系统、高压燃油系统等关键零部件的性能测试及可靠性测试技术的研究，开发高压燃油、排气后处理系统以及运动件、配附件等的性能测试及可靠性专用智能化试验设备。完成测试系统内部接口协议互联互通基础标准规范工作。完成关键零部件的振动、可靠性、性能及在线监测数据采集库的建设，形成支撑整机和关键零部件评价、开发的共享数据库。

（6）内燃机排气能量回收技术平台

1）建设目标。集合行业骨干企业，突破排气能量回收系统核心零部件关键技术，包括换热器、膨胀机、冷凝器、热电材料等，实现工程化。

2）重点任务。数据库建设。开展换热器材料与结构、膨胀机组件和热电材料的研究，提高系统效率和耐温耐腐蚀性，完成应用工程的研究。

6.2 行业人才培养

6.2.1 发展历程

我国内燃机工业起步于 20 世纪初。1908 年，广州均和安机器厂参照英国产品试制成我国第一台煤气机。随后的 40 年中，上海、广州、常州、无锡、南京、昆明、天津、山东等地的 20 余家企业陆续开始了内燃机的制造和生产。我国大学内燃机课程的设置可以追溯至 20 世纪初，交通大学、同济大学等都开设了内燃机相关课程，但并没有设立内燃机专业。这一时期的学校教育与实际生产的联系也不够紧密。由于技术落后，又缺乏理论指导和人才支持，新中国成立前我国的内燃机工业以参照国外产品进行试制为主，核心零部件依赖进口，产量低，质量差，性能落后。

新中国成立初期开始系统建设内燃机工业体系，不仅规范了企业生产流程，更重视教育和研发，在高校中设立内燃机专业，并建立内燃机研究机构，加强人才培养和技术研发。从 1952 年开始，天津大学、交通大学（1956 年内燃机专业迁往西安交通大学）、北京工业学院（现北京理工大学）、江苏大学等高校相继设立内燃机专业。截至 1965 年，全国有 30 余所高等院校设立了内燃机专业。据保守估计，1953 至 1965 年间，我国按内燃机（包括船舶内燃机）专业招收和培

养的高级工程技术人才约 12 000 人，其中一些优秀人才成为我国内燃机企业、研究所、高校甚至国外一些企业中的骨干。这一时期，高校培养人才的侧重点在于解决生产和研发中遇到的实际问题，为内燃机行业培养输送大批专业技术人员，还形成了产学研相结合的科技攻关队伍，对解决内燃机燃烧理论、气流运动、零件强度等方面的问题，为我国内燃机产品质量的提升以及产品种类的完善做出了重要贡献。

“文革”期间由于生产目标的改变，我国内燃机产量虽然有所提高，但产品结构单一，高校教育也基本处于停滞状态，我国内燃机的技术水平并没有得到发展，反而拉大了与国外的差距。

改革开放以后，高校招生人数增加，硕士点和博士点的设立也使高校培养模式从教学为主转变为教学与科研并重，在培养大批高水平技术人才的同时也造就出一批高水平研究型人才。这一时期高校培养的优秀人才为内燃机产品质量的提升，种类的丰富以及品质的提高做出了重要贡献，成为当今内燃机企业、高校中科研、管理团队中的骨干。

进入 21 世纪，我国内燃机企业创新性不足的问题凸显出来，亟须加强自主研发与创新能力，一方面对人才的需求量增大，另一方面对人才的专业素养和创新能力提出了更高的要求。高校在教学和科研过程中也注重创新能力的培养，并积极进行国际交流与合作，学位授予条件也更为严格，尤其是博士和硕士学位对论文数量、论文学术水平、创新性方面的标准日益提高。

6.2.2 人才培养现状

目前，我国进行内燃机专业人才培养工作的高等院校共 48 所，其中 19 所具有博士学位授予权，41 所具有硕士学位授予权（如表 6-3 所示）；与内燃机有关的国家重点实验室 2 所；16 所高校、18 家企业设有与内燃机有关的博士后流动站或博士后科研工作站。

表 6-3 高校学位授予情况

序号	院校	学位授予权			博士后流动站
		本科	硕士	博士	
1	北京工业大学	√	√	√	√
2	北京理工大学	√	√	√	√
3	大连海事大学	√	√	√	
4	大连理工大学	√	√	√	√

（续）

序号	院校	学位授予权			博士后流动站
		本科	硕士	博士	
5	哈尔滨工程大学	√	√	√	√
6	哈尔滨工业大学	√	√	√	√
7	海军工程大学	√	√	√	
8	华中科技大学	√	√	√	√
9	吉林大学	√	√	√	√
10	江苏大学	√	√	√	√
11	内蒙古工业大学	√	√	√	
12	清华大学	√	√	√	√
13	山东大学	√	√	√	√
14	上海交通大学	√	√	√	√
15	天津大学	√	√	√	√
16	同济大学	√	√	√	√
17	武汉理工大学	√	√	√	√
18	西安交通大学	√	√	√	√
19	浙江大学	√	√	√	√
20	北京交通大学	√	√		
21	长安大学	√	√		
22	长沙理工大学	√	√		
23	重庆大学	√	√		
24	广西大学	√	√		
25	河北工业大学	√	√		
26	合肥工业大学	√	√		
27	河南科技大学	√	√		
28	湖南大学	√	√		
29	华南理工大学	√	√		
30	解放军重庆通讯学院	√	√		
31	军事交通学院	√	√		
32	昆明理工大学	√	√		
33	山东科技大学	√	√		
34	山东理工大学	√	√		

（续）

序号	院校	学位授予权			博士后流动站
		本科	硕士	博士	
35	太原理工大学	√	√		
36	武汉大学	√	√		
37	西华大学	√	√		
38	西南交通大学	√	√		
39	中北大学	√	√		
40	中南大学	√	√		
41	装甲兵工程学院	√	√		
42	佳木斯工学院	√			
43	江西工业大学	√			
44	上海工程技术大学	√			
45	邵阳学院	√			
46	沈阳理工大学	√			
47	盐城工学院	√			
48	中国农业大学	√			

1. 高校人才培养

现阶段高校人才培养的总方针是以科学发展观为指导，认真贯彻落实国家科教兴国战略及人才强国战略，贯彻落实《国家中长期教育改革和发展规划纲要（2010—2020 年）》的精神。按照“综合化、多样化、国际化、科学性、系统性、先进性”的原则，努力培养具有社会责任感、全球视野和创新精神的卓越人才。

（1）培养理念与方法　高校的人才培养理念可以概括为“重视基础，追求卓越”。致力于培养在内燃机领域内具有坚实的理论基础和知识及解决实际问题能力的宽基础、高素质、具有创新精神和实践能力的高级专门人才，以胜任内燃机相关制造工厂、研究机构等从事设计、制造、研究和开发等方面的高级工程技术工作。

本科阶段的培养工作主要由教学、实习和实践三个方面组成。首先，推进骨干课程的改革，改变学生的学习模式，实现从“讲授与学习知识”到“探索与应用知识”的模式转变，从“以考试为目的”的学习模式改为“以创新应用为目的”的创新实践模式。然后，通过金属工艺实习、生产实习等环节，建立起理论与实际之间的联系，强化学生对所学理论的认知。通过发动机相关实验（如发动机拆

装实验、发动机性能试验等）增强学生的实践能力；利用创新平台培养学生的创新能力。建立由骨干课程、科研实习基地、产业实习基地以及创新实践平台组成的教育资源网络支撑体系，有效支撑卓越人才培养目标。通过群体熔炼、实际应用以及创新牵引激发学生兴趣。在课堂教学、实习和创新实践等环节中，拉近职业场景，并构造差异化群体，使师生相互启发与激励，激发学生的学习兴趣与实践创新的激情。

硕士阶段的培养方式由教学型转变为研究型，旨在培养具备创新性思维并能够独立进行科学研究的高素质人才。通过参与国家或企业的研究项目，培养学生的科学素养；通过完成个人的研究课题，培养学生的创新意识、逻辑思维能力、搜集整合信息能力、科技论文写作能力以及分析解决科学问题的能力。博士阶段的培养以科研为主，通过让学生负责科研项目或项目中的部分模块，培养学生的洞察力和全局观念，能够发现问题并提出可行的解决方案，并能够分清主次，合理规划工作内容，确保工作顺利完成。同时，在科研过程中，还要求学生的知识结构“既博且专”，既要涉猎广，能够准确把握该领域内的核心问题和前沿动态；又要做到“术业有专攻”，能够切实可靠的解决遇到的科学或工程问题。

在本科和研究生的培养过程中，各高校尤其是研究型高校都对国际交流与合作给予了高度重视。我国内燃机专业已与世界多所著名大学进行研究生的联合培养工作，包括美国加州大学伯克利分校、美国麻省理工学院、美国宾夕法尼亚大学、美国威斯康星大学、美国密西根大学、美国伊利诺伊州立大学、美国明尼苏达大学、美国普林斯顿大学、英国拉夫堡大学、英国布鲁奈尔大学、德国卡尔斯鲁大学、瑞典隆德大学等。此外，还定期邀请上述大学的知名教授进行免费授课。高校也积极参加和承办国际学术会议，为拓宽学生视野、促进交流与合作做出了贡献。

（2）人才培养

1)现有人才培养模式与行业需求适应性不够。为了适应我国经济的高速增长、拓宽专业口径，国家提倡“淡化专业、拓宽口径、加强基础、注重综合素质和创新能力”的人才培养模式。然而，目前国内大多数企业为了适应市场对产品的需求，缩短产品的研发周期，迫切希望高校能培养出很快适应工作要求的“专门化”工程技术人才。这样就形成了学校的教育模式与企业的经营理念之间的冲突，产生了宽口径人才培养与专门化人才需求的矛盾。面对这种矛盾，首先要实现“专才”与“通才”教育的合理结合。“专才”与“通才”是适应于不同类型企业的两种高素质的工程技术人才；其次高校更需要结合专业特点，采取有效措施，深

化专业改革、提高教学质量。

2）高等院校人才培养体制。目前有内燃机专业的高校，尽管采取了各种吸引外来人才和强化自主培养等措施，但是仍然普遍觉得师资力量不足，缺乏有企业实践经验的教师，以欧洲的高校为例，许多教师来自相关企业，都具有相当丰富的实际工作经验，甚至在高校授课过程中都还参与企业的科研项目和技术开发，这与我国高校的师资力量有着明显的差别。

课程体系存在不够合理，教育培养方案与企业要求适应性不够的问题。高等教育强调通用技术教育，企业希望新入职毕业生能很快适应工作需要。欧美工科大学重视专业基础知识学习，所开设的一些课程与企业需求时刻紧密结合，一些大学设有企业顾问委员会，这些专家成员对培养方案进行评阅。国内本科生学习内容多，学生理论基础较扎实。国内的课程体系划分过细，偏重于课堂知识的传授，忽视学生自主学习与研究，实践环节完成的质量普遍不高，可供选择的空间不大，不太利于研究生的兴趣点和研究方向差异化发展。

教材建设跟不上社会需要的发展。以往我国高等教育过于注重传统的理论教育，对教材内容的更新不太重视，教材知识老化现象非常严重。

2. 企业人才培养

为了加强自主创新开发能力，推进自主品牌建设。国家的人才计划，如“千人计划”等为企业的发展做出了重要贡献，实现了企业发展与人才培养的有机结合。工程研究院、技术中心、国家重点实验室、博士后科研工作站等平台为人才提供了专业化的发展环境和技术支持，形成了企业与人才相互依托，共同发展的双赢局面。在组织实施自主创新研发和产品技术升级工作中，积极开展对外合作与交流（包括高校、研究所、国际知名企业等），科学的做到了引进技术和消化吸收兼容并蓄，实现了推进内燃机行业的技术进步和人才培养，有效地提升了全行业的自主开发能力，推动了内燃机行业创新体系建设和发展。

3. 领军人才培养

领军人才是人才队伍中的核心，是高层次人才队伍中的重要代表，特别是在增强自主创新能力方面，具有重要的引领作用。

4. 技能人才培养

技能人才是推动技术创新和实现科技成果转化不可缺少的重要力量，是技术创新的实践者和推动者。内燃机制造行业的技术工人中技师严重短缺，要重视技能人才尤其是高素质技能人才培养，加大技能人才培养力度，建立一支数量充足、

门类齐全、掌握现代机电技术的技术工人队伍。

内燃机技能主要指内燃机制造、使用、维修等领域的设备操作技能、工艺操作技能、试验调试技能、装配技能等，属于内燃机中、初级专业人才，是我国高等职业技术学院、中等职业学校及技工学校的培养目标。在制造环节中，很多设备的操作技能、工艺操作技能、装配技能等可以不需要具备内燃机理论知识（如车工、焊工等），这些人才可由职业院校、技工学校相关专业培养。试验调试技能、使用维修技能则必须具备一定的内燃机理论知识。内燃机操作技能人才的培养重在实践动手能力的培养，学校必须为学生创造尽可能多的动手机会。技工、技师院校技能人才培养应以就业为导向确定专业设置；以职业能力和要求为主线确定课程设置，组织教学内容；以职业技能标准为依据强化技能训练；以典型产品（服务）为载体设计教学活动。实行校企合作、工学结合、顶岗实习的人才培养模式，是技工、技师院校技能人才培养必由之路，技工、技师院校技能人才培养的办学目标、专业课程设置、教学计划制定、教材编写、教学安排、教学评价以及从实施教学到学生就业的全过程都必须与企业密切合作，校企双方共同研究与实施，以保障技能人才培养的教学质量。

6.2.3 新要求及挑战

国家科技部《中国科技人才发展报告（2014）》指出：2012 年我国科技人力资源总量达到 6 960 万人，已成为第一科技人力资源大国。然而，我国的研发人员所占比例不足世界最高水平的 1/4。人才资源的缺乏是存在于我国各行业发展过程中的普遍问题，也是制约内燃机核心技术突破的重要原因。

为了促进企业的自主创新发展，坚持人才为本的战略，把内燃机行业人才培养作为推动行业发展的根本，加大人才培养力度，重点培养产业发展急需的专业技术人才、职业技能人才，在关键技术领域培育一批领军人才是十分必要的。基本思路如下：

1）建立学校教育和实践锻炼相结合、国内培养和国际交流合作相衔接的开放式培养体系。突出培养学生的科学精神、创造性思维和创新能力。加强实践培养，依托国家重大科研项目和重大工程、重点学科和重点科研基地、国际学术交流合作项目，建设一批高层次创新型科技人才培养基地。

2）建立培养本科、硕士和博士不同层次、多种类型工程技术创新人才的教育新体系，坚持面向现代化、面向世界、面向未来，充分发挥教育在人才培养中

的基础性作用，立足培养全面发展的人才，突出培养创新型人才，注重培养应用型人才，深化教育改革，促进教育公平，提高教育质量。

3）加强学校与企业的密切合作，着力提高学生工程实践能力和创新能力，加强产学研合作，重视企业人才的培养，推动科技人才向企业集聚。加强领军人才、核心技术研发人才培养和创新团队建设，形成科研人才和科研辅助人才衔接有序、梯次配备的合理结构。

4）完善权责明确、评价科学、创新引导的科技管理制度，健全有利于科技人才创新的评价、激励措施，充分发挥人才的主观能动性，积极参与培养工作，主动发挥自身的能效。

5）在资源和环境约束不断强化的形势下，建设科学的人才培养体系，以人才促发展，才能为我国内燃机工业的发展提供源源不竭的动力，才能提高中国内燃机品牌的国际竞争力。

6.3 机制与制度

进一步强化和完善内燃机产业的相关政策措施，加快建立以企业为主体、市场为导向、产学研用紧密结合的技术创新体系，充分发挥企业在技术创新、研发投入、科研和成果转化中的主体作用。进一步完善科技支撑战略性新兴产业发展和传统产业升级的机制，围绕战略性新兴产业需求部署创新链，增强市场竞争力，充分发挥市场机制的促进作用，为内燃机产业的发展保驾护航。

6.3.1 强化企业技术创新主体地位，促进科技与经济紧密结合

加快建立企业为主体、市场为导向、产学研用紧密结合的技术创新体系建设。建立以内燃机生产制造企业主导的产业技术研发创新体制，充分发挥企业在技术创新和成果转化中的主体作用。“十三五”时期国家重点建设的工程技术类研究中心和实验室，优先在具备条件的行业骨干企业布局。科研院所和高等学校要更多地为企业技术创新提供支持和服务，促进技术、人才等创新要素向企业研发机构流动。支持行业骨干企业与科研院所、高等学校联合组建共性基础技术研发平台和产业技术创新战略联盟，合作开展核心关键技术研发和相关基础研究，联合培养人才，共享科研成果。

完善高新技术企业认定办法，落实相关优惠政策。落实企业研发费用税前加计扣除政策，改进企业研发费用计核方法，合理扩大研发费用加计扣除范围，加大企业研发设备加速折旧等政策的落实力度，激励企业加大研发投入。建立健全国有企业技术创新的经营业绩考核制度，落实和完善国有企业研发投入的考核措

施。加大国有资本经营预算对自主创新的支持力度，支持中央企业围绕国家重点研发任务开展技术创新和成果产业化。营造公平竞争的市场环境，大力支持民营企业创新活动。加大对中小企业、微型企业技术创新的财政和金融支持，落实好相关税收优惠政策。扩大科技型中小企业创新基金规模，通过贷款贴息、研发资助等方式支持中小企业技术创新活动。建立政府引导资金和社会资本共同支持初创科技型企业发展的风险投资机制，实施科技型中小企业创业投资引导基金及新兴产业创业投资计划，引导创业投资机构投资科技型中小企业。完善支持中小企业技术创新和向中小企业技术转移的公共服务平台，健全服务功能和服务标准。

完善科技支撑战略性新兴产业发展和传统产业升级的机制。建立科技有效支撑产业发展的机制，围绕战略性新兴产业需求部署创新链，增强市场竞争力，充分发挥市场机制对产业发展方向和技术路线选择的基础性作用，通过制定规划、技术标准、市场规范和产业技术政策等进行引导。加大对企业主导的新兴产业链扶持力度，支持创新型骨干企业整合创新资源。加强技术集成、工艺创新和商业模式创新，大力拓展国内外市场。优化布局，防止盲目重复建设，引导产业健康发展。在事关国家安全和重大战略需求领域，明确制约产业发展的关键技术，充分发挥国家重点工程、科技重大专项、科技计划、产业化项目和应用示范工程的引领和带动作用，实现核心技术重大突破，促进产业加快发展。

加强技术创新，推动技术改造，促进传统产业优化升级。围绕品种质量、节能降耗、生态环境、安全生产等重点，完善新技术新工艺新产品的应用推广机制，提升传统产业创新发展能力。针对行业和技术领域特点，整合资源构建共性技术研发基地，在重点产业领域建设技术创新平台。建立健全知识转移和技术扩散机制，加快科技成果转化应用。

加快完善统一、开放、竞争、有序的市场经济环境，通过财税、金融等政策，引导企业增加研究开发投入，推动企业特别是大型企业建立研究开发机构。依托具有较强研究开发和技术辐射能力的转制科研机构或大企业，集成高等院校、科研院所等相关力量，组建国家工程实验室和行业工程中心。鼓励企业与高等院校、科研院所建立各类技术创新联合组织，增强技术创新能力。改革科技计划支持方式，支持企业承担国家研究开发任务。国家科技计划要更多地反映企业重大科技需求，更多地吸纳企业参与。在具有明确市场应用前景的领域，建立企业牵头组织、高等院校和科研院所共同参与实施的有效机制。完善技术转移机制，促进企业的技术集成与应用。建立健全知识产权激励机制和知识产权交易制度。大力发

展为企业服务的各类科技中介服务机构，促进企业之间、企业与高等院校和科研院所之间的知识流动和技术转移。国家重点实验室、工程（技术研究）中心要向企业扩大开放。加快现代企业制度建设，增强企业技术创新的内在动力，把技术创新能力作为国有企业考核的重要指标，把技术要素参与分配作为高新技术企业产权制度改革的重要内容。坚持应用开发类科研机构企业化转制的方向，深化企业化转制科研机构产权制度等方面的改革，形成完善的管理体制和合理、有效的激励机制，使之在高新技术产业化和行业技术创新中发挥骨干作用。营造良好创新环境，扶持中小企业的技术创新活动。中小企业特别是科技型中小企业是富有创新活力但承受创新风险能力较弱的企业群体，要为中小企业创造更为有利的政策环境，在市场准入、反不正当竞争等方面，起草和制定有利于中小企业发展的相关法律、政策；积极发展支持中小企业的科技投融资体系和创业风险投资机制；加快科技中介服务机构建设，为中小企业技术创新提供服务。

6.3.2 发挥行业研究院所的作用

充分发挥行业研究院所的重要作用，以提高创新能力为目标，以健全机制为重点，进一步深化管理体制改革，加快建设“职责明确、评价科学、开放有序、管理规范”的现代科研院所制度。要切实改变目前部分科研机构职责定位不清、力量分散、创新能力不强的局面，优化资源配置，集中力量形成优势学科领域和研究基地。社会公益类科研机构要发挥行业技术优势，提高科技创新和服务能力，解决社会发展重大科技问题；基础科学、前沿技术科研机构要发挥学科优势，提高研究水平，取得理论创新和技术突破，解决重大科学技术问题。建立稳定支持科研机构创新活动的科技投入机制。学科和队伍建设、重大创新成果是长期持续努力的结果。对从事基础研究、前沿技术研究和社会公益研究的科研机构，国家财政给予相对稳定支持。根据科研机构的不同情况，提高人均事业经费标准，支持需要长期积累的学科建设、基础性工作和队伍建设。建立有利于科研机构原始创新的运行机制。自主选题研究对科研机构提高原始创新能力、培养人才队伍非常重要。加强对科研机构开展自主选题研究的支持。完善科研院所的院所长负责制，进一步扩大科研院所在科技经费、人事制度等方面的决策自主权，提高科研机构内部创新活动的协调集成能力。建立科研机构整体创新能力评价制度。建立科学合理的综合评价体系，在科研成果质量、人才队伍建设、管理运行机制等方面对科研机构整体创新能力进行综合评价，促进科研机构提高管理水平和创新能力。建立科研机构开放合作的有效机制。实行固定人员与流动人员相结合的用人

制度。全面实行聘用制和岗位管理，面向全社会公开招聘科研和管理人才。通过建立有效机制，促进科研院所与企业和大学之间多种形式的联合，促进知识流动、人才培养和科技资源共享。

大学是我国培养高层次创新人才的重要基地，是我国基础研究和高技术领域原始创新的主力军之一，是解决国民经济重大科技问题、实现技术转移、成果转化的生力军。加快建设一批高水平大学，特别是一批世界知名的高水平研究型大学，是我国加速科技创新、建设国家创新体系的需要。我国已经形成了一批规模适当、学科综合和人才汇聚的高水平大学，要充分发挥其在科技创新方面的重要作用。积极支持大学在基础研究、前沿技术研究、社会公益研究等领域的原始创新。鼓励、推动大学与企业和科研院所进行全面合作，加大为国家、区域和行业发展服务的力度。加快大学重点学科和科技创新平台建设。培养和汇聚一批具有国际领先水平的学科带头人，建设一支学风优良、富有创新精神和国际竞争力的高校教师队伍。进一步加快大学内部管理体制的改革步伐。优化大学内部的教育结构和科技组织结构，创新运行机制和管理制度，建立科学合理的综合评价体系，建立有利于提高创新人才培养质量和创新能力，人尽其才、人才辈出的运行机制。

在抓好大学教育和人才培养的同时，也要加大职业和专业化教育的人才培养。要瞄准市场需求，为行业和企业培养一大批上手快，技术过硬，懂市场、会技术的能工巧匠，为内燃机行业的持续发展培养坚实的人才队伍。

6.3.3 全面推进和完善创新体系建设

抓住内燃机节能减排技术链的关键点，构建产业链，形成价值链，全面推进和完善创新体系建设，实现内燃机产业的可持续发展。

以内燃机的节能减排技术链为关键点，建设以企业为主体、产学研结合的技术创新体系，全面推进国家创新体系的建设。以企业为主体，坚持技术创新的市场导向，有效整合产学研的力量，切实增强国家竞争力。通过产学研结合，有效配置科技资源，激发科研机构的创新活力，使企业获得持续创新的能力。在大幅度提高企业自身技术创新能力的同时，建立科研院所与高等院校积极围绕企业技术创新需求服务、产学研多种形式结合的新机制。建设科学研究与高等教育有机结合的知识创新体系。以建立开放、流动、竞争、协作的运行机制为中心，促进科研院所之间、科研院所与高等院校之间的结合和资源集成。加强社会公益科研体系建设，发展研究型大学，努力形成一批高水平的、资源共享的基础科学和前沿技术研究基地。构建建设军民结合、寓军于民的国防科技创新体系。从宏观管

理、发展战略和计划、研究开发活动、科技产业化等多个方面，促进军民科技的紧密结合，加强军民两用技术的开发，形成全国优秀科技力量服务国防科技创新、国防科技成果迅速向民用转化的良好格局。建设各具特色和优势的区域创新体系。充分结合区域经济和社会发展的特色和优势，统筹规划区域创新体系和创新能力建设。建设社会化、网络化的科技中介服务体系。针对科技中介服务行业规模小、功能单一、服务能力薄弱等突出问题，大力培育和发展各类科技中介服务机构。充分发挥高等院校、科研院所和各类社团在科技中介服务中的重要作用。引导科技中介服务机构向专业化、规模化和规范化方向发展。

6.3.4 组建内燃机协同创新中心

完成内燃机动力协同创新等相关中心的组建，实现跨学科、跨链条、跨部门、跨行业间有效协同，提高内燃机工业自主创新能力，加快突破内燃机产品节能减排关键核心技术。建立国际化、高素质、创新型人才培养基地，工程科学与关键技术研究基地，学科链、资源链、技术链和产业链协同创新示范基地以及国际合作与交流开放基地。

6.3.5 建立行业知识产权联盟，开展协同运用试点建设

坚持市场导向。以企业为主体，充分发挥市场在资源配置中的决定性作用，发挥知识产权制度对产业创新资源的配置力，建立和完善利益分配机制，激励高校院所、金融机构、知识产权服务机构、创业群体等开展产业专利协同运用。

加强资源整合。利用联盟化手段整合全产业链知识产权资源，凝聚全产业链创新力量，解决产业发展中的知识产权问题，降低产业创新成本，提升产业创新效率。依托知识产权资源，优化配置金融资源、技术资源、人力资源、政策资源等，提升产业创新驱动发展能力。

创新服务内容。联盟内坚持互利互助，丰富服务内容，为成员单位创新发展提供综合服务，提升产业知识产权运营水平。坚持开放共享，依托联盟内资源，运用互联网思维，构建开放的创新创业服务平台。

1. 加强产业关键领域知识产权运营

（1）建立订单式知识产权研发体系　在产业关键领域，推动相关高校院所、科研机构和产业上下游企业的联系与合作，建立创新前端充分对接、过程紧密结合、后续知识产权保护的产学研合作机制。以市场为导向、以知识产权运营为目的，推动建立“产、学、研、金、介、用”深度融合的产业核心知识产权研发体系，积极构建专利组合。

（2）构筑和运营产业专利池　根据产业发展需要，面向核心技术和产品联合进行多类别、多地域、多层级、多用途的知识产权布局，全面覆盖和有效保护产业创新成果和成员单位合法权益。按照“自愿参与、互利共赢”的方针，围绕产业链上下游核心技术和产品，构建若干个集中许可授权的专利池，形成专利池之间相互支撑的专利集群，分别制定合理的许可政策并开展商业运营，支撑联盟成员与产业共同发展。组建知识产权运营机构，通过专利的转让、股权化、资本化等方式提升知识产权资产收益。

（3）推进知识产权与标准的融合　根据产业发展和市场竞争需要，制定标准制（修）订计划，积极参与和主导国家及行业技术标准制修订工作，推动建立标准制定和专利池构建的良性互动机制。联合开展定向化、系统化的知识产权前瞻布局，制定并推行产业核心产品与关键技术相关标准，推动相关必要专利纳入产品和技术标准，形成知识产权与技术标准的有效衔接和捆绑运用，促进知识产权、标准与市场活动的紧密融合。

（4）共同防御知识产权风险　建立产业知识产权侵权监控机制，对主要竞争对手知识产权布局情况进行有针对性的跟踪分析，预判知识产权风险和威胁。建立产业知识产权风险应对机制，主动采取知识产权联合布局、防御性知识产权收购、知识产权许可谈判和启动专利权无效程序等多种形式，共同应对可能发生的产业重大知识产权纠纷与争端，增强风险防范和处置能力，保障产业发展安全。

2. 支撑成员单位创新发展

（1）开展产业专利导航分析服务　开展产业专利导航分析，明晰全球核心专利分布和竞争格局，综合研判产业发展方向，引导产业知识产权布局，规避知识产权风险，为联盟成员参与国际竞争赢得战略主动。建立产业知识产权信息数据库，支撑联盟成员开展专利信息的定向跟踪监测和深度分析，服务联盟成员研发立项、企业并购、市场开拓等决策。

（2）构建以专利池为基础的产业发展核心要素池　根据产业和成员单位发展需要，依托专利池，通过自筹经费、质押融资、引入风险投资等方式筹集资金，构建与专利池相匹配的资金池和人才池，推动形成“知识产权 + 资金 + 人才”的产业发展核心要素池，为创新发展提供综合服务。

（3）搭建知识产权产业化孵化体系　通过自建或者与孵化器合作的方式，创新知识产权孵化模式，实现专利技术二次开发和产业化，提供创业辅导、融资

服务、试验平台、标准厂房及所需的知识产权运营和其他创新服务等。

参考文献

[1]中国内燃机工业协会组编.《中国内燃机工业诞辰一百周年纪念文集》[C].北京：机械工业出版社， 2008：10.

[2]中华人民共和国教育部.《普通高等学校本科专业目录（2012年）》[N/OL].http://www.moe.edu.cn/publicfiles.

[3]中华人民共和国教育部.《学位授予和人才培养学科目录（2011年）》[N/OL]. http://www.moe.edu.cn/publicfiles.

[4]中华人民共和国教育部.《国家中长期教育改革和发展规划纲要（2010—2020）》 [N/OL].http://www.moe.edu.cn/publicfiles.

[5]中华人民共和国工业和信息化部.《国家中长期人才发展规划纲要(2010—2020）》 [N/OL].http://www.miit.gov.cn/.

[6]中华人民共和国教育部.《卓越工程师教育培养计划》[N/OL].http://www.moe.edu.cn/publicfiles.

第 7 章

推动内燃机产业可持续发展

内燃机产业坚持把可持续发展作为建设内燃机制造强国的重要着力点，发展循环经济，提高资源回收利用效率，构建绿色制造体系，走生态文明的发展道路。通过强基工程建设，加强基础零部件、基础工艺、基础制造技术等体系能力；坚持加强节能环保技术、工艺、装备等的研究和推广应用；坚持走创新驱动的发展道路，把创新摆在全行业发展全局的核心位置，建设公共技术服务平台，推动跨领域跨行业协同创新，突破一批重点领域关键共性技术；运用互联网技术、云计算、大数据分析等技术手段，转变传统的研发、生产制造、营销服务、组织管理等思维、模式、方法，促进从研究、设计、开发到生产制造等过程的变革，促进行业生产数字化、网络化、智能化发展，促进产业转型升级，促进我国从内燃机制造大国到制造强国、从中国制造到中国创造的转变，推动我国内燃机产业可持续发展。

7.1 绿色、智能制造基础技术

内燃机产业应加大先进节能环保技术、工艺和装备的研发力度，加快制造业绿色改造升级；积极推行低碳化、循环化和集约化生产，提高制造业资源利用效率；强化产品全生命周期绿色管理，努力构建高效、清洁、低碳、循环的绿色制造体系。提升全行业制造信息化水平，数字化、网络化、智能化取得明显进展。

7.1.1 绿色制造基础技术

绿色制造是一个综合考虑环境影响和资源效益的现代化制造模式，其目标是使产品在设计、制造、包装、运输、使用到报废处理的整个产品生命周期中，对环境的影响（负作用）最小，资源利用率最高，并使企业经济效益和社会效益协调优化。绿色制造这种现代化制造模式，是人类可持续发展战略在现代制造业中的体现。该技术的组成包括绿色设计、工艺规划、材料选择、产品包装、回收处理、绿色管理、设备利用。

1. 铸造技术

（1）开发与应用新的铸造材料　目前内燃机正向轻量化、高比功率方向发展，对发动机的壁厚、强度、耐热疲劳等性能要求越来越高，传统的低强度灰铸铁越来越难以胜任。目前，用于铸造内燃机零部件的材料正在向高性能、多元化方向

发展。

铸铁由于成本低、铸造性能优良，仍是未来一段时间生产发动机铸件的主要材料。目前使用越来越多的铸铁有高强度灰铸铁、球墨铸铁和蠕墨铸铁。随着高强度灰铸铁熔炼技术的不断成熟，更高材质牌号的灰铸铁大量生产并用于生产薄壁高强内燃机铸件。目前，HT300 已用于缸体、缸盖的生产，有的产品已用到 HT350，使铸件壁厚降到 3 ～ 5mm，本体断面硬度差＜ 40HBS。球墨铸铁具有很高的强度和韧性，适合制造曲轴、连杆、齿轮等强韧件，在欧美发达国家的应用发展迅速。蠕墨铸铁力学性能及铸造性能介于灰铸铁及球墨铸铁之间，适合于制造强度要求较高和需要承受高热循环负荷的零件，并具有良好的减重、降噪效果，国外在大马力或高强化发动机缸体上的应用日益增多。

铝合金、镁合金的密度分别是铸铁的约 1/3 和 1/4，在发动机轻量化应用中发展迅速。通过进一步提高铝合金熔体纯洁度、进行变质处理，能够获得满足高性能铸件所需铝合金液。目前，铝合金发动机缸体、缸盖、活塞等已广泛应用。国外在耐高温、耐磨铝合金开发上处于领先地位，已开发出全铝缸套或不需要镶嵌缸套的铝合金缸体。其次，通过采用高压模铸工艺（HPDC），获得的高强薄壁铝合金缸体，比常规低压铸造生产的铝合金缸体轻 50% 以上。镁合金铸件由于铸造技术要求高，目前仅国外部分高端汽车发动机采用镁合金缸体。随着技术的不断成熟，轻质的铝合金、镁合金将更多地用于内燃机铸件的生产。

高性能塑料、复合材料、粉末冶金材料等新材料由于在轻量化、使用性能、成型工艺等方面的优势，已大量应用于发动机零部件的生产，并逐步替代传统铸件。

（2）实施绿色铸造模式　绿色制造是社会可持续发展战略在制造业中的一个体现，是一种可持续发展的企业组织、管理和运行的新模式。铸造行业作为制造业中的基础行业，资源、能源、环境容量需求大，必须采取符合社会可持续发展的绿色铸造模式。

绿色铸造是将综合预防污染和合理利用资源的环境策略，持续地应用于实际的铸造生产，以实现企业的环境自净，达到尽可能多的自行消纳本企业产生的废弃物和尽可能少地向外界排出废弃物。

绿色铸造发展应遵循循环经济 3R 行业准则，即减量化（Reduce）、再利用（Reuse）、再循环（Recycle）。当前绿色铸造发展的主要技术及措施包括：

减量化：①减少原材料的消耗：如采用新的材料如高牌号铸铁、蠕墨铸铁，

实现薄壁高强铸件的生产；采用近净成形技术，减少加工量；采用高压铸造生产薄壁高强的铝合金铸件；采用计算机技术优化工艺，降低开发过程中原材料的消耗；采用先进浇注系统实现铸件的精确浇注等。②减少能源的消耗：采用大型高效、外热送风、计算机控制、水冷连续作业冲天炉；采用冲天炉—感应电炉或冲天炉—电弧炉双联熔炼，可提高熔炼效率，降低能耗；铝合金采用快速集中熔炼炉；选用冷芯盒技术制作砂芯等。③减少污染物的排放：采用新的造型技术如近净成形技术可省去缸体、缸盖砂芯的需求；采用高效除尘器减少铸造生产中废气、粉尘的排放；采用环境友好的无机粘结剂或少粘结剂的铸造工艺，如消失模铸造或水玻璃砂型铸造，有利于改善铸造条件、解决旧砂再生问题及减少环境污染。

再利用：砂型铸造中的落砂通过冷却后再进入到砂处理系统中混制型砂；不合格铸件、浇冒口清理后重新熔炼用于浇注；冷却循环系统中的能量回收利用等。

再循环：砂型铸造生产中产生的废砂通过热法及机械再生的方式得到循环利用。加大废钢及回炉料的利用，以减少新生铁和铝资源的耗费。

2. 机加工技术

现阶段在内燃机制造中微量润滑切削、干式加工、柔性化夹具等技术已大量运用于加工工艺中。部分工厂已采用缸体缸孔激光造型珩磨、零件二维码追溯系统等新技术。

近年来，由于计算机的图形处理技术、信息网络技术、材料技术、激光技术、机电技术、控制技术和精密器械等的发展，使得以三维数字模型为基础的、以激光立体成形制造技术为代表的增材制造技术（Additive Manufacturing，AM）——即 3D 打印技术，已经从研发转向产业化应用，成为先进制造业的重要组成部分。这种新兴的先进制造技术基于离散－堆积原理，由零件三维数据驱动，采用材料逐渐累加的方法直接制造出实体零件。相对于传统的材料去除－切削加工技术，增材制造技术是一种“自下而上”的制造方法。这种制造方式由于不需要传统的刀具、模具和夹具以及多道加工工序，可在一台设备上快速精密地制造出任意复杂形状的零件，实现零件的“自由制造”，从而可以解决许多复杂结构零件的成形，且大大减少加工工序，缩短加工周期，节约材料消耗，废弃污染少。这种制造方式理论上可以制造出任意复杂结构的零件，所以对结构越复杂的产品（零件）其制造的速度、优势作用越明显，可以实现创新设计的小批量、低成本数字化制造。因此，这种制造技术将特别适合于批量小、结构复杂、个性化特征鲜明、研发阶段样品的“快速成形”“快速制造”。

随着增材制造技术与信息网络技术的深度融合，或将给传统制造业带来变革性影响。西方媒体把这种实体自由成形制造技术誉为将带来“第三次工业革命”的新技术。我国把增材制造产业列入了战略性新兴产业，并制定了相应的产业发展推进计划。因此，可以预期，采用包括增材制造技术在内的先进制造技术来改造提升我国内燃机传统制造业，并形成产业规模，再加上互联网技术、大数据技术的运用，将对今后我国内燃机产业从研发、生产制造到营销管理等方面的组织方式的变革，实现制造业转型升级，促进提质增效，抢占未来科技和产业制高点产生很大的影响。

3. 下线测试技术

（1）内燃机试验中能量回收　传统的内燃机出厂试验，测功采用水力测功机，精度低，响应速度慢，不仅无法反拖测试机械摩擦，而且还需要配置冷却水循环系统，试验中消耗燃油发出的能量未得到利用，造成大量浪费。今后发展趋势是用交流电力测功器代替水力测功机，交流电力测功器试验台架作为功率吸收单元，将吸收的发动机输出轴功率高效地转变为电功率，向电网回馈符合并网质量的交流电能量。这种交流电力测功系统的能量转换和回馈的效率可达 92% ～ 95%。此外，运行、维护费用的节约也使交流电力测功器的经济性更令人瞩目。这种燃油—发动机—机械能—电能—再利用的过程，完全符合循环经济、节能环保的要求。现在，在内燃机测试领域，交流电力测功器已经成为首选的测功设备。以交流电力测功器为主体的发动机测功试验台，由于可以把发动机输出的轴功以电能形式回收实现节能，可以模拟发动机动态或瞬态工况，满足发动机按照法规要求进行动态或瞬态循环测试。因此作为一种先进的测试技术，交流电力测功系统的应用已越来越广泛。值得指出的是，虽然建立交流电力测功器台架的初期投资费用比水力测功器和电涡流测功器高，但从长期使用的角度分析，由于能够将发动机运行输出的轴功高效转换并反馈到电网，从而节省大量运行成本，可在较短时期内回收投资费用，而在以后的运行中就可以产生盈余。一般地，这种测试系统在连续运行 2 ～ 3 年后就可以回收这种投资差价，投资效益十分明显。

（2）柴油机试验尾气处理　柴油机出厂试验时产生的尾气排放将对周围大气环境产生不可忽视的影响，应该加以处理。通常把各个发动机出厂试验台位的尾气排放集中起来排入一个最终的排出口，通过在该最终排出口外加设机外尾气净化装置加以集中处理。柴油机的气态排放污染物主要是氮氧化物 NO_X，净化 NO_X 的方法主要采用选择性催化还原法（Selective Catalytic Reduction，简称 SCR

法），就是将尿素〔CO（NH_2）$_2$〕—水溶液通过管线进入尾气净化装置内部，喷雾系统将尿素—水溶液雾化变为微液滴状态并与高温尾气充分混合，在高温尾气的作用下尿素—水溶液中的尿素迅速被加热至160℃以上分解，产生气态氨（NH_3）和缩二脲（CONH），其中气态氨（NH_3）将在随后的催化条件下与尾气中的氮氧化物（包括NO和NO_2）发生化学还原反应，还原反应后的终产物为完全无害的氮气和水，从而达到消除NO_X污染的目的。

7.1.2 智能制造基础技术

内燃机产业智能制造是集成内燃机制造技术与通信以及信息、计算机网络、智能控制等技术的应用，具有自律能力、人机一体化、虚拟现实技术、自组织与超柔性、自学习与自我优化能力、自修复与自我维护能力等特点，因而适应性极强，能够大大提高内燃机生产的效率、产品品质和市场应变能力，降低制造成本，从而增强市场竞争力。

1. 铸造技术

（1）提升铸造行业的自动化及智能化　目前，工业发展已从传统的机械化向自动化以及更高级别的智能化方向发展。世界上工业化水平高的国家如美国、德国、日本等，目前已开始实施“再工业化”“工业4.0”或类似的战略，正在开展以运用信息网络物理系统（Cyber-Physical Systems，CPS）等核心技术实现智能化生产为中心的第四次工业革命。我国作为制造业大国，推进中国式“工业4.0”——“中国制造2025”的发展，不仅是我国由制造业大国向制造业强国迈进的重要举措，也是制造业可持续发展的必由之路。

铸造行业作为工业零部件生产的基础行业，其水平在一定程度上反映了一个国家工业的发展水平。美国、德国和日本等工业发达国家，其铸造行业水平处于世界领先地位。

我国铸造行业通过吸收、引进国外先进技术及装备，不断提升行业发展水平，尤其是内燃机铸件生产走在我国铸造行业发展的前列。代表目前我国内燃机生产自动化水平的生产技术及设备主要有带自动换模、砂型检测的自动化静压造型线、水平射压造型线、垂直射压造型线等造型线；具备随流孕育、温度检测的全自动浇注系统；带有自动型砂性能检测和控制的全自动混砂机；用于大型复杂砂芯生产的制芯中心；通过积放式辊道将击芯机、磨削机、抛丸机等清理设备串起来的清理线。在特种铸造方面，有自动化压铸生产单元、自动化重力铸造单元等。国外先进的铸造工厂，机器人使用范围大大超过国内企业。如金属熔炼及铸件打磨

工序采用机器人，能极大地提高生产效率及降低工人劳动强度。自动熔化系统可通过计算机对熔炼生产进行全面控制，采用机器人代替操作人员实现加料、扒渣、测温、取样等操作。自动化清理单元由机器人自动从工具库中选择所需的工具对铸件边角、内腔等进行清理。

目前，我国发动机铸件生产仍处在局部自动化水平，未来还需进一步加强整个铸造生产、甚至是上下游的自动化。

（2）铸造中计算机技术的应用　计算机技术对铸造工业的发展作用重大，主要体现在开发、测试与控制、管理等方面。

在开发方面，计算机技术的应用目前主要集中在以下几方面：①合金的开发：利用合金理论及规律开发的计算机软件可进行合金的组织设计及微观设计，通过计算机模拟，可为合金开发提供指导，避免传统成分调整的经验设计、试验造成的周期、成本等费用的增加。②新产品的开发：包括新产品的三维设计、模具、砂型、砂芯等的设计，能够很大程度减少工作量、降低成本、缩短试制周期及提高经济效益，常用软件有 UG、ProE、CATIA 等。③凝固模拟：铸造凝固过程数值模拟主要用来进行铸造合金凝固理论研究和铸造工艺研究。在凝固理论方面，研究内容包括合金的生核、晶体产生方式、枝晶间距、成分过冷等；在铸造工艺方面，利用计算机软件对浇注系统、冒口、冷铁、浇注条件等进行设计，预测缩孔、缩松、变形、应力等缺陷，通过改进找出合适的铸造工艺方案，常用软件有 MAGMA、Pro-CAST、Deform、Anycasting、CAE/InteCAST 等。

在测试与控制方面，计算机技术贯穿于生产的各个环节：①熔炼方面：对熔炼速度、温度、合金成分利用计算机技术进行测试，并配合其他辅助设施予以控制，获得满足生产要求的金属液。②造型方面：可以实现各种铸造生产线的自动化运行，调节参数，以获得合格铸件。③清理方面：在计算机控制下的机械手和机器人自动完成清理工作。④检测方面：包括合金成分、金相组织的炉前检测，型砂的在线检测与控制，铸件的在线硬度检查、内窥检查、X 射线探伤等。

在管理方面，计算机技术应用主要集中在以下两方面：①数据库与专家系统：铸造数据库是铸造相关企业、科研机构等共同参与建立的一个涵盖合金材料、造型材料、工艺参数、供需关系等各种信息的数据中心（集合），使参与者能够实现数据共享，促进铸造行业水平的提升。专家系统是运用人工智能技术和计算机技术将众多专家的知识、经验和解决问题的方法、方案等储存、集成起来并能够模拟人类专家思维方式进行推理、做出判断和决策、解决本领域问题的计算机智

能程序系统。这种专家系统使计算机能像领域专家一样思考、分析和处理，解决一些复杂的问题，是铸造智能化的重要组成部分。②现场管理：采用计算机对铸造企业原辅材料、成品、进度、质量、能耗、人员、财务等进行管理与组织，以实现铸造生产的运行正常、质量合格、费用最低。

计算机技术的开发与应用并不是仅仅停留在某一方面，而应该是集成应用。国外提出了 CIMS（Computer Integrated Manufacturing System—计算机集成制造系统）概念，是通过计算机硬件、软件并综合运用现代管理技术、信息技术、制造技术、自动化技术及系统工程技术，将企业生产全过程中有关人、技术、经营管理三要素及其信息与物流有机集成并优化运行的复杂大系统。作为一种先进制造系统和新型生产方式，其将为企业带来理想的经济效益。目前工业发达国家已在一定程度上推广应用。

目前，我国铸造行业计算机技术的应用、开发还处于起步阶段，尤其是生产企业的应用与国外还有很大差距，因此需要铸造企业以及科研机构共同努力推进其发展。

2. 机加工技术

（1）柔性智能化制造技术　柔性制造技术是对各种不同形状加工对象实现程序化柔性制造加工的各种技术的总和。它是将自动化技术、信息技术和传统加工技术等融合在一体的一种现代集成制造技术，把以往工厂企业中相互孤立的工程设计、制造、经营管理等过程，在计算机及其软件和数据库的支持下，构成一个覆盖整个企业的有机系统，是一种能够进行自动变换、人机对话转换、智能化任意变化地对不同加工对象实现程序化柔性制造加工的崭新技术，具有先进性、柔性化、自动化、智能化、省力化和效率化等优点。按规模大小可分为柔性制造系统（Flexible Manufacturing System，FMS）、柔性制造单元（Flexible Manufacturing Cell，FMC）、柔性制造线（Flexible Manufacturing Line，FML）和柔性制造工厂（Flexible Manufacturing Factory，FMF）。

柔性化智能制造技术与以往应用 IT 技术来实现自动化生产的过程有着本质的区别，是可以实现数字化、智能化、个性化和定制式批量制造的过程：

1）数字化制造。通俗地讲就是制造领域的数字化，将数字化技术和制造技术进行融合，并在虚拟现实、计算机网络、快速原型、数据库和多媒体等支撑技术的支持下，根据用户的需求，迅速收集资源信息，对产品信息、工艺信息和资源信息进行分析、规划和重组，实现对产品设计和功能的仿真以及原型制造，进

而快速生产出达到用户性能要求的产品的整个制造全过程。其内涵主要包括数字化设计技术（如：数字化建模、虚拟设计、创新设计、数字样机设计、面向制造的设计 DFM）、制造过程数字化控制（如：智能控制技术、高速高精度驱动、嵌入式数字制造、远程诊断、智能维护）、生产管理（包括企业协作）的数字化技术（如：控制传感技术、实时信息管理技术、数字化车间技术、制造系统建模、决策控制、高速通信网络协议、信息集成技术、资料共享技术、信息安全技术）三个层面。数字化制造技术需要解决制造过程的建模与仿真、网络化敏捷设计与制造、虚拟产品开发等关键技术，涉及 CAD（计算机辅助设计）、CAE（计算机辅助工程分析）、CAM（计算机辅助制造）、CAPP（计算机辅助工艺规划）、PDM（产品数据库管理）、ERP（企业资源计划）、RE（逆向工程，Reverse Engineering）和 RP（快速成型，Rapid Prototyping）等核心技术。

2）智能化制造。就是面向产品全生命周期、满足客户个性化需求、关注全价值链的制造，是在现代传感技术、网络技术、自动化技术、拟人化智能技术等先进技术的基础上，通过智能化的感知、人机交互、决策和执行技术，实现设计过程、制造过程和制造装备智能化，是信息技术、智能技术与装备制造技术的深度融合与集成，是信息化与工业化深度融合的大趋势。它使得由智能设备、智能系统和智能决策代表的机器、设备组、设施和系统网络的工业世界能够更深入地与由链接、大数据和分析所代表的数字世界进行融合。

智能制造的发展方向就是产品智能化（具有人机交互、自适应工况、在线自主决策等功能）、装备智能化（能够将专家的知识和经验融入感知、决策、执行等制造活动中，赋予产品制造在线学习和知识进化能力，实现自学自律制造）、车间智能化（能够对生产全局进行管控）、工厂智能化、供应链智能化等，最后实现“互联网 + 制造”的智能制造模式。

智能制造的关键技术是数字化制造、机器人、3D 打印和传感器等。

3）个性化定制式制造。就是让用户介入产品的生产过程，企业按照客户的订单需求进行生产，使用户可以获得自己定制的个人属性强烈的商品的生产制造模式。这是一项产品全生命周期（从设计、制造到使用等过程）、全价值链、端到端的系统工程。

在互联网时代，随着电子商务的出现，一方面，消费者对产品个性化的追求不断强烈，要求制造业能够实行柔性化智能生产；另一方面，互联网技术与工业先进智能控制技术、新型智能机器人技术、云计算技术等的深度结合加快了生产

过程的自动化、智能化和柔性化，使智能化的自主生产成为可能。企业可以以大数据平台为基础，以柔性化生产为依托，根据客户需求进行个性化的定制生产。因此，智能化生产，个性化定制是“互联网 + 制造”和“制造 + 互联网”发展的要求和必然趋势，已经成为当前世界先进制造业发展的重要方向。

当前，我国制造业面临着产能过剩和人力成本比较优势弱化，产品附加值低，竞争力不强等一系列问题。另一方面，未来市场竞争的核心将不再是商品和商家，而是消费者。因此，今后企业只有根据客户的需求来进行产品设计、制造和提供个性化服务，才能吸引消费者，留住消费者，提高竞争力。

智能化生产、个性化定制的推行将从节约成本、提升效率、拓展价值等几个方面为中国制造转型升级提供有效途径，进而推动供给侧结构性改革。

由上可见，柔性化智能制造技术利用互联网技术、信息物理系统、大数据分析和云计算技术等可以解决更为复杂的产品设计制造问题、处理更大的数据量、缩短创新设计周期，从而大大缩短产品的生产周期，提高企业的效率；由于满足快速变化的市场需求，所以生产效率更高；由于可以动态配置资源，提高了柔性，不仅适用于多品种小批量生产，也适应个性化、大规模、多品种多批量、高质量、低成本生产；由于大大提高能源和资源利用率，减少浪费和污染物排放，实现了绿色制造。

在内燃机制造业中，基于数字控制（Numerical Control，NC）技术的高速加工中心的快速发展，适用于这类机床可充分发挥切削性能的刀具的开发，如涂层硬质合金刀具、立方氮化硼（CBN）刀具、金刚石刀具和陶瓷刀具，使高速加工中心应用于大批量生产组建柔性制造线 FML 成为可能，改变了过去加工中心只适用于中小批量多品种生产范围，从而可以推广到大批量、多品种的柔性生产，使内燃机制造更快地响应市场需求成为可能，目前在世界范围内获得了广泛应用。这种柔性生产线也迅速地在我国内燃机零部件的制造中得到日益广泛的应用。特别是进入 21 世纪以来，我国各大汽车厂内燃机配套企业和独立的 OEM（Original Equipment Manufacture）内燃机供应商均组建了内燃机零部件的 FML 生产线。FML 生产线以高速加工中心或高档数控机床为主，配置部分数控专机、清洗机、压堵试漏机、机动辊道和气动平衡吊等。部分生产线还配置了龙门式机械手、机器人、物料储存单元、在线监测装置、随行托盘等，进一步提高了生产线柔性自动化程度，使生产线功能进一步拓展，生产效率更高。柔性自动加工线目前已成为内燃机机加工工艺的首选。

在生产线智能化、信息化方面，生产线组成结构主要分为信息层、控制层和执行层。通过采用现场总线技术主要完成底层设备单机控制、联机控制、通信联网、在线设备状态监测及现场设备运行，生产数据的采集、存储、统计等功能，保证现场设备高质量完成生产任务。采用以太网络技术将现场数据传递到信息层，实现远程监控、管理等。国内外控制系统厂商（如 SIEMENS 和 FANUC）对控制系统和软件进一步优化升级，为建设数字化、智能化工厂奠定了基础和创立了条件。

（2）虚拟制造技术在内燃机机械加工中的应用　虚拟制造技术是指以虚拟现实和仿真技术为基础，对产品的设计、生产过程统一建模，在计算机上实现产品从设计、加工和装配、检验、使用整个生命周期的模拟和仿真。

随着新一代信息技术与制造技术融合发展，虚拟制造技术在内燃机机械加工虚拟生产过程和虚拟产品制造方面开始崭露头角。应用计算机仿真技术，对生产线规划，零件的加工方法、工序顺序、工装和工艺参数的选用以及加工工艺性等均可建模仿真，优化生产线布局、性能、加工工艺及参数，提高加工效率，降低生产费用。

如某企业新建 10 万件 / 年四缸机缸体柔性线，在建设过程中采用西门子 MLP（Machining Line Planner）软件，构建加工中心、料架、围栏、导轨、清洗机、试漏机、压套机、拧紧机和珩磨机等设备的 JT 格式三维模型，并建立以加工中心为主的柔性缸体生产线的可视化模型。基于仿真分析与优化算法相结合的方法，得出四种布局规划方案，在节拍、设备利用率、物流时间、成本、可靠性和生产线扩展性能等一系列参数指标上的分析评价数据，优化了生产线布局，缩短了生产线流程，提高了机床利用率。

柔性智能化制造技术和虚拟制造技术在内燃机加工中的广泛应用，必将为智能工厂 / 数字化车间的建设奠定坚实的基础，将加快人机智能交互、工业机器人、智能物流管理、增材制造等技术和装备在生产过程中的应用，促进制造工艺的仿真优化、数字化控制、状态信息实时监测和自适应控制。

3. 智能化装配技术

内燃机装配是制造过程中的最后一个环节，也是一个重要环节。智能化装配技术是指集成应用网络技术、数字化技术和测控技术等，以柔性的工装为装配定位、夹紧平台，以数字化测量装置为在线检测工具，将零件按规定的技术要求组装起来，并完成调试、检验使之成为合格产品的装配过程数字化执行系统（As-

sembly digital system，ADS）。这是 FMS 的一个重要组成部分。采用智能化装配技术可以提高装配制造的效率和质量，降低劳动强度，是先进制造技术的重要发展方向之一。装配生产现场包括三条主线，即工艺精益化、质量控制和生产监控。

在工艺精益化主线中，系统从企业现有的产品数据管理系统 PDM（Product Data Management）/CAD 系统中导入产品和部件的三维装配模型，根据从装配 CAPP（Computer Aided Process Planning）系统中导入的工序、工步等信息，将产品级和部件级的三维装配模型转换为基于工步的装配过程仿真模型。在现有装配工艺的基础上，根据从车间装配现场总结的装配经验和知识、以及通过装配 / 试验集成获得的装配知识，来进行装配工艺的精益化，从而更好地指导装配现场的操作。

在质量控制主线中，将工艺 BOM（Process bill of material，PBOM）与质量 BOM（Quality bill of material，QBOM）进行关联集成，并通过数字化的检验控制技术，严格落实质量控制要求，同时进行数字化质量信息采集，便于进行后续的质量分析和预测。

在生产监控主线中，通过任务 BOM（Task bill of material，TBOM）将制造 BOM（Manufacture bill of material，MBOM）、PBOM、QBOM 以及制造资源进行关联集成，并通过可定制的工作流将任务发布到装配环节中的各相关角色的工作台面上，以装配任务的“推送”机制保证装配工作的调度和监控。

7.2 关键设计技术

提高内燃机创新设计能力是推动内燃机产业可持续发展的重要方面。要以道路车辆和非道路移动车辆配套用内燃机为重点，开展创新设计示范，全面推广应用以绿色、智能、协同为特征的先进设计技术，加强设计领域共性关键技术研发，攻克信息化设计、过程集成设计、复杂过程和系统设计等共性技术，开发一批具有自主知识产权的关键设计工具软件，建设完善创新设计生态系统。要建设若干具有世界影响力的创新设计集群，建设一批国家级专业化、开放型的设计研究机构，激发全行业创新设计的积极性和主动性。

随着世界各国和地区降低燃油消耗（CO_2 排放）和排放等强制性法规的日益严格，强制性法规已经成为发动机技术进步和创新设计的最大驱动力。而要实现内燃机的创新设计，首先就是要开展新燃烧技术的研究，创新内燃机燃烧方式和燃烧理论，如低温燃烧控制技术（LTC），通过基于 CAE 分析的三维

数值燃烧和性能模拟的燃烧设计，实现多模式组合燃烧优化，获得高强化、高效率、低污染的清洁燃烧，达到提高发动机动力性、经济性，实现“近零”排放的目的。

为了满足市场窗口和法规的双重需求，产品开发周期必须要和法规周期相对应，应用的产品技术也必须要满足或适应法规要求。由于技术越来越复杂，要求越来越高，而开发周期要求是一定的或有缩短趋势，这就给发动机设计提出了严峻挑战。为此，需要解决设计的本质、设计缺陷的本质，提高设计的科学性、时效性，提高技术设计和产品的竞争力问题。

内燃机设计是为了达到特定的运输工具或动力机械要求的动力性、经济性、法规（排放、油耗、安全）、市场、成本、可靠耐久等目标而实施的一系列策划、计划、概念设计、计算分析、试验验证活动，并最终实现从创新的理念到创新的产品的过程，是一个多学科的交互融合的过程，这也决定了内燃机设计技术的复杂性。

设计也是发现、发掘并满足客户需求的创造过程。衡量设计竞争力有五项典型标志：洞察用户需求、人无我有、人有我优、差异化竞争、开发周期短。只有不断挖掘客户的潜在需求、开展包括新燃烧技术和理论、增压技术、低摩擦技术、排气后处理技术等在内的各种发动机新技术的研究和开发，推广应用新技术、才能做到在设计和产品上引领并赢得未来市场。为提高内燃机产业的整体竞争力，“十三五”期间应提升如下关键设计技术：

1）先进的三维燃油喷射过程和喷雾特性 CAE 数值模拟技术，这是发动机喷雾燃烧设计、性能设计的基础。

2）在先进燃烧技术和理论指导下的燃烧策略、燃烧模式、燃烧过程和燃烧系统设计技术。这是提升发动机性能、降低排放污染物的基本要求。

3）发动机燃油喷射、增压、燃烧、低摩擦、排气后处理以及各种可变技术等核心技术，这是实现创新设计、开发先进发动机的基础条件和必要保障。

4）实现面向客户需求的设计技术。将客户潜在的需求转化为产品设计参数是提高产品竞争力的基础，也是内燃机行业目前存在的技术短板。建立挖掘、识别、转化用户需求为产品参数的技术平台，真正实现面向客户的设计。

5）实现大数据环境下的数字化设计技术。通过建立、充实、完善全方位的数据库，充分利用国内外技术资源，实现大数据环境下的数字化设计，并实现结构、工艺的网络协同一体化设计。

6）虚拟样机设计技术。支持建立内燃机虚拟设计、虚拟匹配标定、虚拟开发平台，实现基于 CAE 技术的虚拟样机设计平台：通过不断提高 CAE 仿真设计精度逐步减少试验验证，实现用虚拟样机完成大部分设计、试验及产品认证工作，提高产品开发质量、降低开发成本和缩短开发周期。

7）设计认证体系。建立科学的设计认证体系，不断提高产品的可靠、耐久水平。

8）基于专家数据库的智能协同网络设计技术。建立内燃机结构设计、性能设计、可靠性设计数据库，不断提高设计精准度。创建基于数据库的智能协同网络设计技术，实现总布置设计到零部件设计的内部协同以及与供应商的外部协同的设计；固化发动机各专业的知识点、对标数据、设计样板与标准、CAE 分析及评价标准；拓展设计“软件功能”，实现全设计过程数据 PDM 管理，并实现设计与工艺无缝对接，大幅缩减研发周期。

9）先进的设计开发工具、软件、方法和开发流程以及各种规范、标准的建立和推广应用。

10）建立、推广先进的仿真优化和测试技术，提高设计的准确性和效率。

11）要转变思维，充分运用互联网、大数据分析和云计算技术等，创新设计模式，提高设计水平和效率。

7.3 关键制造工艺技术与装备

7.3.1 铸造

1. 推广应用新的造型技术

（1）砂型铸造技术　砂型铸造仍是目前发动机铸件的主要生产工艺。近年来，用于砂型铸造自动生产线的各种造型工艺并行发展，大量国外造型线进入我国，对提升我国铸件生产水平、产品质量、降低成本有巨大推动作用。从目前发展来看，复杂、精度要求较高的缸体、缸盖等铸件仍主要采用静压造型工艺。射压造型由于生产效率高，适用于无砂芯或简单砂芯铸件的生产，并发展了模块化的造型、清理、砂处理生产线，生产组织灵活，成为新建、改造铸造企业选择的重点。目前，国外最先进的垂直分型无箱射压造型线在不下砂芯的情况下，造型速度可达 550 型 /h 以上，并配套在线质量检测及控制技术，极大地提高了铸件的生产效率、产品质量，降低了生产成本。另外，随着冷芯盒制芯工艺的成熟，采用冷芯盒射芯机替代造型机制造铸件上型、下型的冷芯盒精密组芯造型技术，在产品质量、固定资产投资、节能减排等方面具有一定优势，为发动机铸件的生产提供了一个

新的发展方向。

（2）近净成形技术　主要包括以下 4 类：

1）高压铸造（常称“压铸”）技术。高压铸造生产的铸件具有尺寸精度高、表面粗糙度好、强度和硬度较高、尺寸稳定、生产效率高、后续加工少等优势，在铝合金、镁合金铸件的生产中应用广泛。为充分发挥高压铸造的优势，目前生产自动化水平越来越高，由压铸机及周边设备浇注机、机器人、切边机、喷涂机、模温机等组成的自动化压铸单元，可实现自动浇注、压射成型、喷脱模剂、切割浇冒口等工作，能保证产品的一致性、发挥压铸机效率，降低工人技术水平要求及劳动强度。目前，铝合金缸体压铸件的生产基本采用自动化压铸单元。

2）半固态压铸成形技术。半固态压铸成形技术采用的是固液混合的金属浆料通过流变、触变或注射成形的一种技术。该技术具有可成形复杂的薄壁零件、几乎近净成形、尺寸精度高、力学性能可达锻件性能、成品率高等优点，被称为“21 世纪最有前途的材料成形技术”。该技术主要应用于生产铝、镁等低熔点金属小尺寸铸件。目前在美国这一技术已经基本成熟并处于全球领先地位，欧洲等国、日本在该技术应用方面也较为领先，我国还处于研发试验过程中，应用很少。

3）消失模铸造成形技术。消失模铸造成形技术属于一种近无余量、精确成形的工艺，是利用泡沫塑料制造与铸件一样的模样，浸涂耐火涂料并烘干后，埋入干砂中振动造型，在负压下浇注，使模型气化，金属液占据模样位置，冷凝成型的工艺。该工艺能够生产大型、结构复杂、高强度铸件，并且具有生产工序简洁、效率高、绿色环保、建设规模及投资规模小的特点。该工艺产品尺寸精度高达 0.2mm 以内，表面粗糙度可达 $Ra5 \sim 6\ \mu m$，可用于生产铝合金、镁合金、铸铁、铸钢及不锈钢等各类材料，被铸造界誉为“21 世纪的铸造新技术”“铸造的绿色工程”。国外已大量应用该技术生产内燃机等产品铸件。我国也有大量企业建设了消失模生产线生产各类铸件，包括缸体、缸盖等发动机铸件，但是在快速制模技术和模拟仿真技术等方面有待进一步发展。

4）熔模精密铸造成形技术。熔模精密铸造成形技术也属于一种近无余量、精确成形的工艺。该工艺利用可熔材料制成熔模，并在其表面涂覆耐火材料，硬化干燥后熔去内部模样，焙烧后浇注液态金属获得铸件。该工艺与消失模铸造成形具有类似的特点，也是目前精铸生产发展的重点技术。

（3）快速成型制造技术　快速成型制造技术包括立体光刻技术、分层实体制造技术、选择性激光烧结技术、熔融沉积技术、三维印刷技术、热塑性材料选

择性喷洒和无模型树脂砂快速制造工艺等成型方法，集成了 CAD 技术、数控技术、激光技术和材料技术等现代化科技成果。该技术可以自动、直接、快速、精确地将设计思想转变为具有一定功能的原型或直接制造零件，从而为零件原型制作、新设计思想的校验等提供了一种高效低成本的实现手段。因此，快速成型制造技术目前被广泛应用于零件的单件或小排量生产，尤其是新产品的开发。国内企业在发动机缸体等铸件的开发领域已开展了相关应用，例如利用选区激光烧结成型技术直接制作蜡模、砂型等，不仅能生产出符合要求的产品，而且大大节约开发费用及周期，极大地提高发动机生产企业的快速响应能力。因此，快速成型制造技术极具应用前景，但是由于快速成型制造技术对成型设备、工艺及材料等有极高的要求，目前还未普遍推广应用。

7.3.2 机械加工

1. 短加工链技术

随着数控技术、计算机技术、机床技术以及加工工艺技术的不断发展，传统的加工理念已不能满足人们对加工速度、效率和精度的要求。在这样的背景下，复合加工技术及短加工链应运而生。一般来说，短加工链技术是指在一台加工设备上能够完成不同工序或者不同工艺方法的加工技术的总称。在内燃机制造业，短加工链技术主要应用于曲轴和凸轮轴等轴类零件及船用大型发动机机体等箱体类加工。

轴类零件以曲轴加工为例，其粗加工、半精加工采用卧式车铣复合加工中心，如奥地利 WFL 公司生产的卧式车铣复合加工中心。该车铣中心集成了双主轴车削中心，五轴加工中心，深孔镗、铣、钻和三坐标功能于一身，在一台具有双主轴的车铣复合加工中心上可以对曲轴进行完全加工，加工后的曲轴可直接转入精加工工序。精加工工序采用集成的 CBN 数控磨床，即一次装夹磨削全部曲轴主轴颈和连杆轴颈，此类磨床一般配双砂轮头架，如日本 TOYADA 工机、德国勇克（JUNKER）、德国 NAXOS 等生产的此类数控磨床。

大型发动机机体等箱体类零件加工可采用五面体加工中心或五轴联动加工中心完成，尽量减少装夹次数，提高加工精度。

短加工链技术正处于方兴未艾阶段，随着国内外设备厂对复合机床难点的攻坚突破，其在内燃机制造领域的运用会越来越广泛。

2. 内燃机高速及超高速加工技术

随着加工中心技术发展和涂层硬质合金刀具的大量使用，在内燃机加工中机

床切削速度高速化和超高速化现象越来越广泛，切削速度和效率已大幅提高。为进一步提升切削速度，特别是当铣削线速度达到 5 000m/min 以上时，聚晶金刚石（PCD）和聚晶立方氮化硼（PCBN）应运而生。PCD 和 PCBN 具有高硬度、高耐磨性、良好的导热性和低摩擦因数等优异性能，能够满足高速切削、干式切削、硬态切削等绿色制造的要求，非常适宜高速干式切削铸铁类缸体、缸盖等工件。

PCD/PCBN 刀具配合高速数控机床使用，能缩短加工时间达到一半以上，同时也减少非加工时间，增加机床使用寿命，提高加工效率。

如某汽车公司的发动机柔性生产线上应用高性能 PCBN 刀具铣削发动机缸体平面，铣削线速度高达 1 500 ～ 2 000m/min。

铝合金材料的发动机缸体缸盖，则广泛采用 PCD 面铣刀进行高速铣削加工，加工效率与加工质量得到极大提高。如某 PCD 面铣刀参数为：刀具直径 63mm，转速 19 705r/min，每齿进给量 0.12mm，齿数为 5，总进给速度达 12 000mm/min，进给行程为 3 033mm，消耗时间 15.2s，刀具寿命为 10 000 件。而对于相同规格的可转位涂层硬质合金面铣刀参数为：刀具直径 63mm，转速 4 000r/min，每齿进给量 0.2mm，齿数为 6，总进给速度 4 800mm/min，进给行程 3 033mm，消耗时间 37.9s，刀具寿命为 800 件。

由对比可知，在其他条件相同的前提下，PCD 面铣刀消耗的时间比可转位硬质合金面铣刀减少约 60%，而刀具寿命则为原来的 12 倍多，大大减轻了刀具调整等辅助劳动的强度并节省了时间。另外，还可以适当采用带修光刃的刀片，使加工效率、表面质量得到进一步提升。

7.3.3 装配试验

1. 智能自动装配

内燃机智能自动化装配是由装配线和自动化装配及检测设备构成的有机整体，是集信息、机电、影像、互联网于一体的高度自动化系统。内燃机智能自动化装配线由柔性输送单元、智能机器人、智能托盘、精确定位单元、实时在线检测跟踪系统、自动化装配设备、零件输送智能物流系统、人机对话平台、大数据、云端数据平台组成。

柔性输送单元采用模块化设计，根据生产的产品和产量可组合输送单元，灵活改变组线形式和长短以适应工艺调整，如采用智能小车系统（Automated Guided Vehicle，简称 AGV）、智能非摩擦机动辊道，满足工序调整的灵活性要求，并且是物流短捷的需求。

空中及地面移动智能装配及检测机器人具有人机互动的功能，地面移动替代人的操作，智能化程度高，不会疲劳，不惧危险，不会萎靡走神，精准精确，不仅可大大节约企业人力成本，也可使员工脱离繁重岗位，从事更具人性化的工作，对提高生产效率、降本提质、提升企业的生产管理水平作用显著。

智能托盘为嵌入载码体（RFID）的托盘，也被称为数字化托盘。通过数字化托盘，内燃机在与托盘分离前便有了唯一标识，从而可以在复杂的混装线上实现高度的柔性生产，而且将数据存储在每个托盘的载码体内即可实施实时上传和下载，也可以简化中央数据库及信息系统的逻辑关系，便于维护。数字化托盘识读更为简便，而且载码体适用于恶劣环境，即使表面有划痕、污渍也不会影响正常识读。由于托盘在车间内部闭环使用，所以载码体可以被重复使用。

一般地，内燃机装配生产系统由各部件装配、总成装配和与此对应过程的各种检测和控制组成，如气缸盖装配、活塞连杆总成装配、主轴瓦检测、缸套凸出检测、曲轴转动和轴向间隙检查、转矩检测、密封检测、冷态检测等。整个装配生产系统的完备性和先进性又主要取决于装配流水线中各关键工位（控制点）的控制，这些关键工位对于最终所生产出来的发动机的质量是至关重要的。

对内燃机工序间合理的关键控制点进行实时在线检测，像过滤筛一样层层过滤，能够在装配过程中及时、准确地判断和发现缺陷所在，避免了缺陷的传递。实时在线检测在不长的生产周期内大幅度地降低了缺陷发生率，降低了生产成本，提高了装配的效率和质量。

在线实时检测能够从装配过程中对最终产品的质量进行即时预测，采用先进的视觉、全息技术，然后加以科学反馈，实施及时有效的调整，从而以较低的时间成本、物料成本和加工成本生产出高质量的发动机产品。

精确定位单元：内燃机的结构复杂，装配精度要求高，精确的定位是装配的要求，定位方式和适应性是实现智慧装配的基础和关键。

自动化装配设备是自动化装配的实施手段，装配仿真为内燃机的设计和制造提供可装配性验证、装配工艺规划和分析、装配操作培训与指导、装配过程演示等完整解决方案。主要含操作过程、交互装配、虚拟装配、虚拟人模块、三维编辑等对产品进行仿真装配。

2. 现代智能化的冷测试替代热测试

目前内燃机出厂试验一直单纯依靠热测试方式检验产品缺陷和保障产品制造质量，热测试是目前国内发动机出厂质量检测的重要手段。但事实上，热试验方

式只能检测到产品缺陷引发的现象，例如发现润滑油压力过低等，而不能为导致缺陷的原因提供信息，例如发现一个润滑油泵工作不正常等。并且由于在热试验过程中不可避免产生的高负载和内部部件的高速运动，通常会对本已存在缺陷的发动机造成进一步的损坏。热试验要求发动机完全组装并连接所有管线，这也意味着在发现一台发动机存在缺陷之前就必需花费额外的成本。在环境方面，热试验需要很长的试验运行时间、较大的设备占地，更不用说废气排放、冷却液、燃油和防火等必须具备的条件。内燃机热试的测试时间长、使用成本高，且热试时的废气排放及噪声会对环境造成一定的污染。冷试相比热试则具有测试周期短、测试台架数量少、使用成本较低、无废气排放、无试车循环水系统、安全性较高等特点。

冷试技术从严格意义上来讲是一种质量检测手段，是对发动机装配完成后的各系统进行综合测试的技术，通常设在发动机装配线上。在冷试验中，一个外部电机驱动发动机低速运转，通常在 50 ～ 200r/min；发动机各种反馈信号在运转中被高速模拟－数字转化功能的数据采集系统收集获得（采样频率通常在 200kHz ～ 1MHz），数据以 1 ～ 88 个数据点 / 度的高精度与曲轴位置同步。通常情况下，一组数据集代表了发动机转动一周或曲轴转动两周。典型的试验是测量发动机曲轴开始转动和驱动活塞运动所需要的转矩，这个称作“转动或起动转矩”的试验被用来验证发动机是否被正确地组装。在计算机控制下以不同的转速拖动被测试发动机，利用加装在设备上的传感器来收集各种测试数据，测试台软件通过专门的测试算法对采集数据进行处理，并将处理结果与设定的限定值比较，从而决定该发动机装配或零部件质量是否存在缺陷。冷试验是一个不需要点火过程，在发动机装配线上即可检测发动机装配及零部件有关缺陷的技术。发动机冷测试的检测原理是基于正确生产出来的相同型号的发动机都有非常相似的特点，这一相似特点由最少 4 条基线组成，每条基线都是当发动机曲轴转动时连接在发动机上的传感器采集的一系列信号。当发动机以低速运转时，采集发动机一个运转周期（ 720° ）的数据，将测试结果与预设检测范围对比，通过测试 PC 机确定通过或失败，从而达到检测发动机整机装配是否合格的目的。

利用冷测试技术可对以下几个方面进行测试：

1）柴油机系统测试。包括燃油系统泄漏测试及动力燃油泵正时、共轨压力测试。

2）汽油喷射系统测试。包括燃油系统泄漏测试、喷油嘴工作测试、布线线束完整性测试、压力控制阀测试。

3）点火系统测试。包括布线和接头测试、线圈工作测试、火花塞间隙、火花塞绝缘。

4）发动机管理系统测试。包括发动机传感器检查、发动机传动装置测试、布线线束连续性测试。在装配过程中使用冷测试技术，可以在缺陷损坏发动机前发现缺陷，具有自动化程度高，灵活性强 —— 可适用于不同的产品，风险低的特点。

7.3.4 在线测量与信息化技术应用

汽车工业近年来的发展非常迅速，在批量化大生产的今天，既要保证高效，又要保证高质量，在线检测技术和信息化技术就应运而生，它是监督和控制生产过程及产品的眼睛，是发动机制造技术的重要组成部分。在线检测技术在汽车生产中，不但能够准确地判断产品质量性能指标和工艺技术参数是否达到设计要求，而且通过对检测数据的分析处理，能够正确判断这些性能指标和技术参数失控的状况和产生的原因。通过检测设备的信息反馈，对工艺设备进行及时地调整来消除失控现象，从而达到保证产品质量和稳定生产过程的目的。

1．在机加工零部件中的应用

在线检测技术在发动机机加工零部件中应用非常广泛，比如在缸体缸孔、主轴承盖孔及缸盖等加工，面和孔等在线检测技术已经得到普遍的应用，如雷尼绍测量和 MARPOSS 技术。通过集成的在机测量系统，对夹具和零件的装卡、找正，零件编程原点的测定，对夹具、加工前后工件进行在机测量，并通过编程实现对零点及刀具磨损进行补偿、首件零件的检测、工序间检测及加工完毕检测，当在输送线上零部件的定位位置存在偏差，或在线检测不合格时，控制装置发出声、光报警信号。

2．在发动机装配过程中的应用

（1）转矩检测　在发动机及零部件装配过程中，可实现对转矩的精准控制。比如对缸盖螺栓，可以通过在线测量，记录峰值转矩、安装力矩、拧紧角度、拧紧时间等，同时，可进行连接质量分析，屈服点寻找，形成连接性质曲线，也可以避免链接损坏、重复拧紧和人为读取误差等问题。

（2）防纠错　二维码软件的使用是在线检测重要的基础，发动机所有零部件在上线时必须粘贴二维码标签或者供应商交付时雕刻有二维码。在发动机装配

过程中，每一个工位都配备扫码枪，扫码枪中的零部件信息来自装配 BOM，装配前扫描零部件，若信息不符合 BOM，就直接报警纠错，实时采集数据，集成汇总分析存储。

在线检测和信息化技术的应用，为每一工位建立了信息点并且所有工位的信息是联网共享的，每个工位实时自我调整，获得相关工序的信息的同时，实时检测的数据也能提前到下一个工位，建立了完整的数据链。以每一工位的数据为基础，建立的数据链为轴线，每个工序实时互动，相互监督，实时沟通，实现信息化和智能化。

在线检测不仅提高生产率，更重要的是保证工艺精度。归纳起来，发展在线检测技术有如下诸方面优点：理想的在线检测可把废品完全消灭在生产过程之中，从而提高产品在市场中的竞争能力和产品的可靠性；生产过程是在自动调节的情况下进行的，减少了停机检验和调整等辅助时间，提高了劳动生产率；自动进行检测，工人只需操作即可，因而减轻了劳动强度并且避免人为的检测失误，尤其是有些在环境条件比较恶劣的情况下生产的产品，应用在线检测更显示出它的优越性；由于生产的产品能近乎百分之百地成为合格品，因此在线检测技术的应用能节能。

在线检测是把测量技术与自动化控制和计算机技术充分相结合，综合利用科学技术各个领域的成就，把测量系统作为信息系统的组成部分来综合研究分析的方法。在线检测是今后计量与工艺技术中的一个重要的发展趋势。

7.4 关键零部件及材料

7.4.1 国内缸体、缸盖现状及发展趋势

我国除部分实力较强的主机厂逐渐开始自己的发动机正向设计外，大部分主机厂仍然处于跟随阶段。一汽的发动机的自主研发在国内处于领先地位，有着非常全面的零部件和整机试验评价体系，近年来成功投放市场的 CA4GC、CA6GV、CA12GV 等多款高效能汽油机和 CA6DM、CA4DD 等多款柴油机，搭载自主发动机的车型 J6 获得国家科技进步一等奖。

目前，小排量汽油机气缸体灰铸铁仍然占有一定比重，铝合金气缸盖已经逐渐成为主流；对于排量较大的汽油机，如一汽红旗 H7 高配版使用的铝合金 V6 发动机，红旗 L 系列的 V8 和 V12 全铝发动机，在可以遇见的未来，汽油机全铝合金化已成大势。

一汽在柴油机研发方面走在国内同行前列，高强度的 3.5mm 薄壁 HT300 缸体、

缸盖已研发应用。为了满足更加严苛的排放标准，考虑到 HT300 以上牌号的铸造性能，更高强度的蠕墨铸铁气缸体应运而生，国外的多家汽车公司已成功采用蠕墨铸铁制造发动机的气缸体、气缸盖，某些制造商已经批产；一汽目前正在开发大马力发动机的蠕墨铸铁气缸体、气缸盖，材料选择为 RuT450，蠕化率达到 80%以上。但随着灰铸铁材料研究的不断深入，HT350 材料也初步具备产业化应用的能力，所谓的禁区正在不断被突破。因而，究竟是选择蠕墨铸铁还是高强度的 HT350 材料，还要看二者将来的比较优势。

蠕墨铸铁优点在于强度高于灰铸铁，并表现出比灰铸铁优良的综合耐热疲劳性能，考虑到气缸盖对热疲劳的敏感性，蠕墨铸铁比灰铸铁更具竞争力。但应用的难点主要集中在两方面，一是蠕化处理过程中的工艺稳定性问题；二是加工过程中的切削性能问题。国外生产蠕墨铸铁的工艺有：Sintercast 工艺、Oxycast 工艺、Novacast 工艺、Backerud 工艺。一汽正在采用 Sintercast 工艺研制高质量的蠕墨铸铁材料。

7.4.2 内燃机曲轴

调质钢曲轴目前在国内汽车曲轴制造中应用较多，特别是在大型柴油机机型中。为适应大功率的汽车发动机，目前该类曲轴常采用轴颈、圆角同时感应加热淬火的方法，来大幅度提高轴颈耐磨性，消除轴颈与圆角交接处的拉应力，而且使圆角处产生较大的压应力，因而大大提高了曲轴的疲劳强度。

非调质钢曲轴在国内一些汽车制造厂已开始使用，并取得了不错的效果。如为解决康明斯发动机曲轴用钢，东风汽车公司研制出一种新型曲轴用非调质钢 50MnV。一汽集团也已经研发出可用于柴油机曲轴的非调质钢 FAS2239。非调质钢曲轴在保证使用性能的情况下，能降低生产成本，降低能源消耗与环境污染，能适应汽车行业发展节能减排的大趋势，应在行业内逐渐推广。

国内球墨铸铁曲轴应用已非常广泛，其减振性、耐磨性、对缺口敏感性等优于锻钢，尤其是铸造中空曲轴的研发，减轻了曲轴回转质量，且可减少轴拐角处的应力集中。在一汽集团研发的众多发动机中，CA4GA5、ET3、CA4GB、TA1 等机型均采用球铁曲轴。通过轴颈圆角滚压强化或感应淬火处理，进一步提高了曲轴的整体性能。目前国内 ADI 材料在汽车中已有应用，但在曲轴中的应用较少，有待进一步地开发推广。

7.4.3 内燃机凸轮轴

1. 凸轮轴材料

目前我国凸轮轴的制造材料主要分为两类：一类是铸铁，主要有合金铸铁

和球墨铸铁，用于制造汽油机凸轮轴；另一类是合金钢，主要有 45 钢、40Cr 和 GCr15 等，用于制造柴油机凸轮轴。这些材料的优点是材料成本低廉，工艺成熟，生产效率高，易于机械加工，并且能够满足凸轮轴的使用要求。目前凸轮轴材料以铸铁的用量最大。

2. 凸轮轴的制造技术

目前我国的汽油机凸轮轴，由于制造材料主要采用铸铁，所以制造技术主要为铸造。凸轮轴铸造工艺主要采用覆膜铸造，该铸造方法设备和工艺简单，生产成本较小，因此使用最广泛。柴油机凸轮轴主要采用切削工艺制造。凸轮轴大批量生产时也采用锻造工艺制造凸轮轴毛坯。

3. 凸轮轴表面硬化工艺

凸轮轴表面硬化工艺与凸轮轴材料相关，根据材料选择不同的表面硬化工艺。合金铸铁凸轮轴的表面硬化工艺主要采用冷激铸造的方法，使凸轮轴表面产生冷激组织。球墨铸铁和合金钢凸轮轴的表面硬化工艺主要采用中频淬火。这些工艺技术成熟，成本低廉，在我国凸轮轴制造中应用最多。

7.4.4 内燃机排气歧管

国内耐热铸钢排气歧管应用研究起步较晚，大部分生产厂 2011 年左右才开始进行耐热铸钢排气歧管项目预研及小批量生产。但随着国内车企自主研发力量的不断增强，科研投入的逐年递增，正逐步缩短与国际先进车企间的差距。目前国内已有多家车企成功开发出耐热铸钢排气歧管并投入使用。

一汽技术中心于 2014 年对耐 1 050℃以上高温排气歧管用耐热铸钢材料进行立项研究。目前已制定企业标准 1 项，发表论文 2 篇，开发出性能优良的耐热铸钢材料 3 种，并建立材料数据库。开发的部分材料已应用于 V8T 发动机上。

台资企业天津新伟祥工业有限公司是国内较早研发生产耐热铸钢排气零件的生产厂，其技术实力及产业规模在国内处于领先地位。该公司 90% 产品外销到美国、欧洲，还有少量销售到日本。

7.5 高效密封、低摩擦技术

7.5.1 先进非金属材料

1. 内燃机用非金属材料发展现状

随着新能源技术的迅速发展，传统车用内燃机面临更多的挑战，必须进一步向高效节能、低排放、低噪声等方向发展。轻量化是降低内燃机能耗和排放的重要途径之一，因此，车用内燃机也逐渐走向轻量化道路，大量钢铁零件被轻金属

和工程塑料取代，甚至出现非金属内燃机的概念车。

非金属材料在内燃机上应用越来越多，促进了高性能塑料、橡胶、热塑性弹性体、密封垫片等行业的发展，尤其是耐高温、高强度的复合材料和工程塑料发展尤其迅速。聚酰胺和 SMC（玻纤复合）、LFT（纤维增强）等复合材料代替金属材料制造内燃机用进气歧管、油底壳、气缸盖罩盖、水室、水泵叶轮、风扇、齿轮、油泵、挡油盘等零件，能够实现降重 10% ～ 50%，并且达到减震降噪的效果。采用塑料和复合材料代替金属，还能够集成多个零件一次性成型，实现模块化设计，加工简单，节省空间，降低制造和安装成本，因此发展很快，逐渐成为流行趋势。

2. 我国内燃机用非金属材料现状

我国比较缺乏高性能聚酰胺材料，国内没有高性能聚酰胺材料生产厂，只有改性厂，因此发动机用聚酰胺材料 80% 以上依赖进口。国内企业具备一定的发动机用非金属零部件设计能力，但与国外发达国家相比还有不小的差距，而且专门的设计人员和计算分析人员缺乏，很多生产企业在设计阶段依赖于国外材料供应商或模仿国外成熟产品。国内目前发动机用非金属零部件生产设备和生产能力基本能够满足主机厂的需求，试验设备也基本具备，但相对国外先进国家，试验设备的数量不足，试验技术发展落后。

（1）进气歧管　发动机进气歧管的塑料化也是我国目前的发展趋势，新设计的发动机 80% 以上采用塑料进气歧管，但正在生产的老机型仍然使用铝合金等金属进气歧管，塑料进气歧管总体市场占有率 60% 左右。

20 世纪 90 年代初，随合资车型的引入，塑料进气歧管开始使用，其核心技术由外资方控制，产品依赖进口。20 世纪 90 年代末，外资企业开始在国内生产塑料进气歧管，生产线及全套模具从国外引进，设计研发工作仍在国外。进入 21 世纪，随着国内汽车制造技术的不断进步，一些国内企业开始了塑料进气歧管的研制和开发工作。但目前国内大多数的塑料进气歧管生产企业不具备设计开发能力，技术水平良莠不齐。武汉美嘉机械塑料有限公司、马勒东炫滤清器有限公司、上海曼胡默尔滤清器有限公司等中外合资公司，依托外方的技术支持，拥有完整的开发能力和强大的技术支撑，但由于大部分设计工作需在外方总部进行，设计周期较长，成本较高。国内企业如重庆宗申汽车进气系统制造有限公司、宁波神通汽车饰件有限公司、天津惠德汽车进气系统有限公司等，已经具备一定的设计能力。但总的来说，国内塑料进气歧管行业存在产品开发、模具开发、工艺

开发和试验研究专业技术人员严重短缺等问题。欧Ⅳ排放标准实施后，进气歧管必须配备电控可变进气阀等内部控制机构，而金属进气歧管难以满足这一要求。因此，开发性能优异的塑料进气歧管是适应目前发动机技术进步的必然要求，也是国内目前急需解决的问题。

（2）发动机罩盖及油底壳　随合资车型的引入，塑料发动机罩盖开始使用，随后几年内，发动机罩盖由合资企业在国内生产。20 世纪 90 年代末，国内开始生产发动机罩盖并为主机厂配套。但是由于计算分析能力比较弱，模具设计技术落后，国内生产的发动机罩盖存在严重的密封问题，也经常出现开裂等质量问题，所以推广阻力较大，直至 21 世纪初，设计开发能力增强，该类问题得以解决，才得以推广使用。目前，以玻璃纤维增强聚酰胺材料为主的塑料发动机罩盖占有市场 40% 左右，其余以铝合金为主，也有钢板冲压的产品。

塑料油底壳相对应用比较晚。由于国内道路情况复杂，地域广阔，温差比较大，塑料油底壳冬季使用时，汽车颠簸振动、碎石冲击时容易出现损坏。而且塑料油底壳设计和生产难度比较高，所以目前应用的仍然比较少，只占油底壳总量不到 20%。

目前，集成度比较高的发动机罩盖和油底壳在国内尚不具备设计和分析能力，但具备生产能力和试验能力。实力比较强的合资企业，如曼胡默尔公司等，可以实现部分产品的自主研发设计，但结构复杂的产品设计还需依赖国外。

（3）进气管路　国内已经能够设计生产聚酰胺—硅橡胶复合胶管高温高压管路，近 5 年内开始在涡轮增压出气端推广使用，代替金属—硅橡胶复合胶管管路，实现降重 30% ～ 50%。硅橡胶复合胶管内衬层一般采用氟硅橡胶，虽然有国外材料供应商的支持，氟橡胶与硅橡胶的黏接技术仍然不成熟。国内硅橡胶复合胶管由于成本制约、黏接技术等原因，增强层多数采用聚酯、尼龙或涤纶布，相对芳纶布，强度低 50% 以上，为了满足高温高压性能，厚度一般为 4 ～ 6.5mm，制品硬度大，减振效果差。而且多数硅橡胶复合胶管采用手工缠绕成型，质量不稳定。目前，北京天元奥特橡塑有限公司、山东美晨科技股份有限公司等一些实力比较强的公司已经开始采用自动化或半自动化生产线生产硅橡胶复合胶管，采用芳纶布进行增强，产品媲美国外产品，可以出口创汇，技术上取得突破性进步。

目前，国内已经引进多条三维管路吹塑设备，如山东美晨科技股份有限公司、安徽中鼎股份有限公司、宁波均胜汽车零部件有限公司等，都引进国外先进吹塑

设备，能够吹塑软 / 硬段复合热塑性弹性体管路或尼龙管路。目前吹塑热塑性弹性体管路已经在部分新设计车型上开始推广使用，但尼龙复合管路由于成本、技术等原因尚在研发阶段。

涡轮增压发动机的管路非常重要，在一定程度上影响着涡轮增压系统的效率和平稳运转。其他内燃机增压系统同样存在管路输送高温油气混合气的问题，因此管路非金属材料的性能非常重要。我国重点企业已经建立涡轮增压发动机系统振动、高温受力分析和管路设计的能力，并且具备生产能力和检测能力。虽然仍然处在技术跟随的状况，但国内外差距不大。但是高性能热塑性弹性体材料、吹塑聚酰胺材料、耐高温聚酰胺材料完全依赖进口，三维吹塑设备也依赖进口，国内目前没有设计和生产三维吹塑设备的能力。

（4）散热器及中冷器水室　目前国内散热器水室多数仍然采用铸铝件，部分新设计车型开始采用玻璃纤维增强聚酰胺材料注塑成型，密封问题成为制约塑料水室发展的重要因素。由于散热器水室为大型零件，面临大面积平面密封，我国塑料件设计分析技术和模具制造技术还比较落后，解决密封问题仍然是一个难题。目前，该问题技术上已经通过“反翘曲”设计和密封圈材料结构改进解决，但大规模普及塑料水室，还需要一段时间的努力。

中冷器热端连接涡轮增压一侧，国内也开始研究采用半芳香族尼龙进行试制和小规模使用，但是目前仍未普及，技术上依赖国外材料供应商。为了统一供货和外观，冷端水室也基本上仍然采用铸铝件。

用于散热器和中冷器水室的聚酰胺材料必须具备良好的耐冷却液性能，目前国内改性生产的聚酰胺材料无法满足使用需求，材料仍然依赖进口。

国内内燃机采用的非金属材料，包括高性能聚酰胺材料、特种工程塑料、橡胶材料和复合材料，几乎全部依赖进口。目前，注塑生产的设备、模具开发和试验检测国内已经具备一定能力，塑料风扇、塑料齿轮、塑料燃油管路等生产技术已经比较成熟。橡胶零部件的制造技术与国外相差不大，产品也能够满足内燃机行业需求，但进口或合资企业生产内燃机用高端密封产品仍然需要进口。

国内内燃机非金属材料的应用发展落后于国外发达国家，但是随着国外先进整机技术的引入、国外材料供应商的介入、国外先进生产和检测设备的引进，差距在逐渐缩小。但消化引进技术，成为国内企业真正掌握的内燃机用非金属制品制造技术，还需要 5 年以上的时间。而材料技术、模具技术、生产设备技术，还

需要大量技术积累，才能迎头赶上。我们目前需利用国外资源，用于国内的整机技术发展，壮大非金属零部件的设计开发队伍，发展内燃机非金属材料和制造技术，为内燃机节能高效、清洁环保做出更大贡献。

7.5.2 内燃机先进密封材料

1. 动密封材料现状和发展

内燃机行业的密封涉及润滑油、燃油、冷却液以及气路，集成关键材料和工艺，也涉及密封元件的结构设计科学；传统的内燃机普遍存在跑冒滴漏问题，现代的内燃机不允许存在此问题，这就必须依靠先进的密封技术。

我国在密封领域的研发实力、密封产品的技术水平还落后于世界先进发达国家，特别是美、日、德等国家，因此我们应紧紧围绕国家急需并结合自身优势从基础研究和应用研究两方面来开展研发工作，以图在较短的时间里尽快提升研发水平，研发具有自主知识产权的高新产品，解决所涉及的国计民生关键问题。密封技术研究对推动和牵引密封材料和特种加工工艺发展非常重要，同时要对密封机理进行创新性发展，需对密封结构内部在建立大量翔实准确的试验数据的基础上进行详细分析。先进国家的密封技术进展表明，密封技术必须进行材料、工艺、结构、机理等多方面的开创性设计变革，才能适应发动机的发展需要。

2. 工艺黏接密封

黏接密封是机械工业一个主要的行业，国外公司技术先进，产品线丰富，并在国内建厂，在国内内燃机行业，胶粘剂供应商主要有以下几个企业：

（1）汉高　德国汉高公司（Henkel）是应用化学领域中的一家国际性的专业集团，世界 500 强之一，有 330 多家分支机构分布在全球 60 多个国家和地区。

（2）三键　三键化工是一家专业开发、生产、经营工业用胶粘剂的跨国企业，其总部设立在日本东京，主要服务于汽车制造业、电子电器业、民用建筑业以及高端科技等领域。

（3）北京天山　北京天山新材料技术有限公司是专业从事工程胶粘剂研发、制造、销售的高新技术企业。

（4）主流胶粘剂企业市场份额　在汽油机行业，主要供应商为汉高、三键及北京天山三家，具体市场份额如图 7-1 所示。

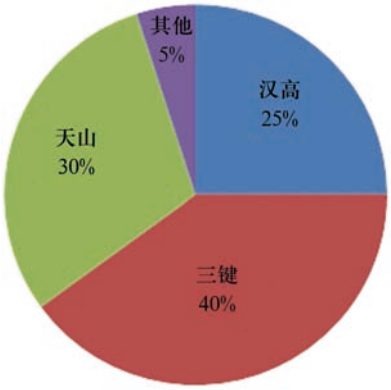


图 7-1　汽油机的密封胶市场份额

在柴油机行业，供应商数量较多，除汉高及三键外，国内胶粘剂企业较多，并且柴油机部分客户仍在使用密封垫。柴油机的密封胶市场份额如图 7-2 所示。

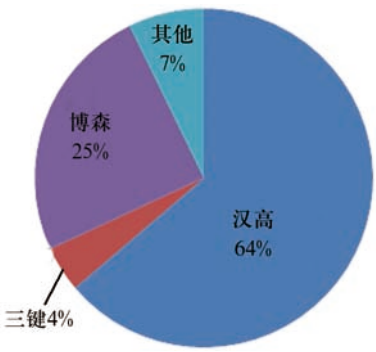


图 7-2　柴油机的密封胶市场份额

7.5.3　低摩擦技术

1. 探索应用先进的表面技术

近年来，国内主要汽车制造商在低摩擦设计、节能降耗等方面已取得了显著的成效。在内燃机关键零部件的新材料、新工艺方面的研究已接近国际先进水平，取得了良好的经济效益和社会效益。

目前，国内的整车和汽车零部件企业开发碳基固体润滑薄膜的制备方法主要采用 PVD 法，这种技术的优点在于：制备过程安全可靠，对环境无污染，成膜速度快、质量高、温度低，而且可以实现全数字化控制，易于量产。同时类金刚

石碳薄膜的摩擦性能由内在的和外在的两方面因素决定：（1）内部的微观结构决定薄膜的硬度和弹性恢复等机械性能；（2）外部的服役环境影响薄膜的摩擦机理。因此选择不同工艺条件调整化学组成和微观结构，可以获得适应各种摩擦副、满足不同工况条件的薄膜，从而实现发动机的节能减排和可靠性的提升。

2. 国内有代表性的研究院所及企业启动相关研究

国内从事固体润滑涂层开发代表性的研究院所有中科院兰州化学物理研究所、清华大学等。其中，清华大学着眼于液相和微观尺度的超润滑体系研究，在微纳机械领域有广阔的应用前景。

（1）兰州化学物理研究所　在国际上首次报道了在大气环境下具有工程化应用价值的超低润滑纳米结构碳基薄膜（利用 UMT 摩擦试验机考察薄膜摩擦学性能，其摩擦因数低至 0.008，耐磨寿命可达 106r/min，实现了大气环境下的超低摩擦），后续发表文章 50 余篇，并就超低摩擦类富勒烯碳基薄膜申报国家发明专利多项。2009 年，中国第一汽车股份有限公司技术中心和兰州化学物理研究所共建了汽车摩擦学实验室，开始了固体润滑碳薄膜在汽车发动机方面的应用探索工作，获得了初步的研究结果。

（2）中国第一汽车股份有限公司　在 2011 年就确定了汽车节能环保技术战略，目标为使一汽自主生产的轿车符合中国第三阶段燃料消耗量法规，开发满足下一阶段油耗限值的关键技术，其中将发动机低摩擦技术作为主要技术进行研究。一汽集团自主产品开发中的设计思路大体如下：首先利用仿真计算对发动机关键部件及总成进行结构优化设计，按计算结果结合先进的表面处理技术制备低摩擦样机，为测量发动机零件及整机摩擦损失，进行发动机反拖摩擦损失测量试验。

图 7-3 为一汽集团自主开发的涂覆 DLC 薄膜的 1.3L 小型汽油机的零部件，包括：挺柱、曲轴和气门。

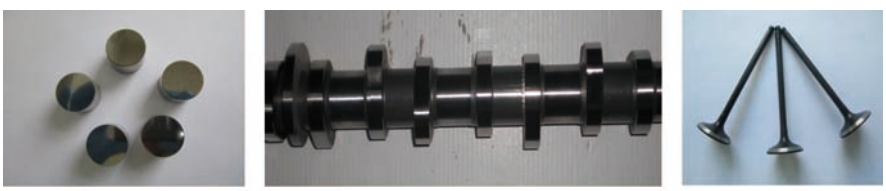


图 7-3　涂覆 DLC 薄膜的发动机零部件

a）挺柱　b）曲轴　c）气门

应用 DLC 薄膜后，发动机配气系统摩擦损失明显降低，转速从 1 000r/min 到 6 000r/min，配气系统摩擦损失平均降低 21.2%，摩擦损失转矩最大可降低 0.81N·m，摩擦损失功率最大降低 0.25kW，如图 7-4 所示。

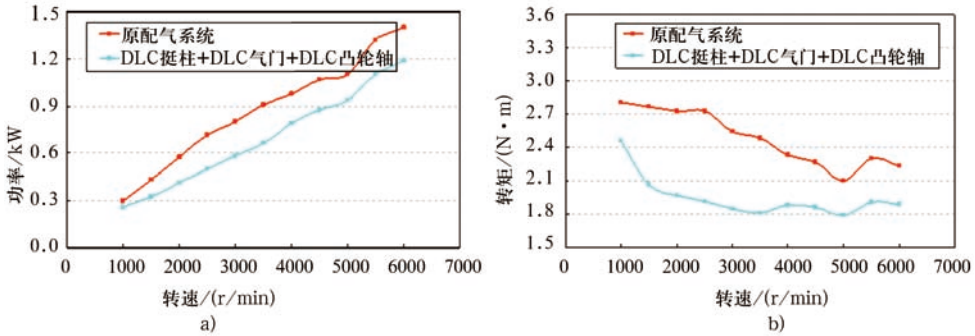


图 7-4　1.3L 小型汽油机摩擦功反拖台架实验结果

a）摩擦功率改善　b）摩擦转矩改善

（3）仪征亚新科双环活塞环有限公司　采用荷兰 hauzer 的物理气相沉积设备，在活塞环上自主开发固体润滑薄膜，包括碳基固体润滑薄膜和氮化系列薄膜，提高发动机活塞组的耐磨性、延长其使用寿命。

（4）其他单位　国内还有一些涂层公司也在开发和生产汽车用固体润滑产品，例如，苏州胜倍尔超强镀膜公司将 DLC 薄膜应用到汽车的门扣上，来提升其使用寿命。星弧涂层新科技材料（苏州）有限公司将 DLC 薄膜涂覆到高压共轨柱塞偶件的表面，降低了磨损量，提高了零件的使用寿命。

3. 国内知识积累方面的经验和成就

经过多年的发展，DLC 固体润滑薄膜生长技术和设备技术逐步成熟，国内外市场上已有批量 DLC 固体润滑薄膜产品销售。美国、日本、欧洲等科技强国不仅重视 DLC 固体润滑薄膜技术的基础研究和应用基础研究，而且更重视技术产品开发和知识产权的保护。而我国研发机构明显表现出严重的重论文发表和成果申报而轻视专利现象，使得我国大量科技投入变为世界共享资源。在我国申请的国内外 DLC 固体润滑薄膜专利对比分析中可看出，国外申请人的专利数量和质量明显高于国内申请人的专利数量和质量，使得我国在 DLC 固体润滑薄膜技术应用和产业化方面处于相当弱势的地位。国际上科技强国的发明专利绝大多数为企业或企业与大学研究所合作开发，专利的实施率较高，而我国大学和研究所专利申请量占很大比例，企业申请量较少，在高技术领域这种情况更为明显。

7.6 测试设备和测试技术

“十三五”期间，随着我国内燃机由制造大国向制造强国的转变，内燃机产品的研发、新技术的进步会加快步伐，对内燃机的测试设备和技术提出了更高的要求。用于内燃机产品、关键零部件、配套设施的试验范围越来越广、试验门类越来越多、与之相适应的测试设备需求量必将大幅增长。但目前我国具有自主知识产权的内燃机测试设备和技术的研发还处于起步阶段，尤其是大型排放测试设备、燃烧测试设备等还主要依赖进口，关键零部件性能的测试设备还未形成规模。提供适用于内燃机开发所需的技术先进、功能完备、智能化的测试设备和技术，不仅有利于提升我国内燃机测试设备和技术的水平，并将极大地提高以内燃机为代表的产品自主创新能力。

7.6.1 测试设备的研发与生产现状

先进的测试设备是创新研发和生产、做强内燃机工业不可缺少的条件，同时也是节能减排的重要保障。然而，目前我国内燃机行业绝大多数企业的在用测功器，基本上还是水力测功器和电涡流测功器，这种设备不仅技术落后，而且消耗大量的能源，严重地制约着内燃机创新发展。节能、技术先进的测功器和配套试验仪器仪表对国外产品的依存度很高，不能满足国内内燃机研发和生产的需求。

1. 内燃机台架测试设备

发动机台架试验是用科学试验的方法来揭示发动机内部特性，评价其动力性、经济性、可靠性等性能的必要途径，是发动机最基本的测试平台，对发动机性能评测有着至关重要的指导意义。

发动机台架试验水平的高低对如实反映发动机的性能、准确发现故障问题、科学提供发动机改善的方向和依据有直接影响。为了能够严格控制试验条件并按照国家标准规定进行测试，尽量模拟发动机在实际使用下的各种工况，发动机台架试验对试验环境、试验设备和试验方法都有严格的要求。

发动机台架试验的目的是检验发动机的性能，而发动机的性能指标有多种，其中转速、转矩、功率、燃油消耗量等用来评价发动机经济性能，除此之外还有负荷性试验、速度特性试验、排放试验、振动与噪声试验等。试验过程中，要对多个参数进行实时监控，并且随着工况的调整，需要在相应的时刻记录下各个测试参数的数值并绘制成相应曲线，作为进一步研究和改进发动机的依据。由于发动机台架试验内容多变、试验过程复杂，所涉及参数种类与数目多、采集频率快、

精度要求高，因此对试验测控系统在功能、性能和扩展性方面提出了较高的要求。传统发动机台架试验系统以测量仪表为核心，导致功能单一，而且不同厂商之间的产品存在软硬件的不兼容，设备与设备之间相互独立，这使发动机台架试验系统的扩展性差，当实验内容发生改变时，往往需要对试验系统做较大改造甚至重建。在精度方面，传统测试系统人员参与记录，不可避免地引入人为误差，因此精度不高，且实时性差、自动化程度低。而最新的精密智能仪器的引进虽然在一定程度上弥补了传统台架的不足，但由于价格昂贵，难以普及。

目前，针对研发过程的内燃机产品性能测试，绝大多数企业基本上以电力测功器为主；在产品出厂试验过程中，以电涡流测功器为主，但还有少数企业仍在使用精度低的水力测功器。国内的测功器生产企业已有一定数量规模，但还缺少高智能化、高测量精度等先进的内燃机性能测功器产品。测功器主要生产企业集中在江苏、浙江、湖南等省份，如，南通常测机电股份有限公司、启东市联通测功器有限公司、湖南湘仪动力测试仪器有限公司等。生产电力测功器和水力测功器的企业主要分布在南通、杭州等城市；生产电涡流测功器的生产企业主要分布在洛阳、成都等城市。随着内燃机产品测试要求的提高，从节能减排的角度，内燃机测试企业开展了出厂综合性能试验研究，设计开发了用于出厂试验的冷试设备，如上海华依科技发展股份有限公司等；部分企业在引进消化吸收的基础上，采用创新集成开发生产内燃机测试系统，如上海同圆发动机测试设备有限公司等。

2. 燃烧系统测试设备与传感器

燃烧过程是提高内燃机热效率、降低排放污染物的一个重要环节，燃烧过程的测试是新型燃烧技术发展和应用的重要基础。发展先进的燃烧系统测试设备以及传感器，对于高效清洁燃烧技术的发展具有重要意义。目前，我国燃烧系统测试设备的开发与国际先进水平还存在较大差距，特别是用于测量影响内燃机燃烧关键参数的测试设备，如燃烧分析仪、缸内高速摄影燃烧分析仪、高速纹影测试装置等，还主要依赖进口。国内仅有少数高校、企业联合开发的一些简单燃烧系统测试设备，但仅用于科研，还均未形成成熟产品和市场。

随着内燃机电控技术的发展，对于传感器的要求也越来越高。目前，国内成熟的传感器产品主要依赖于外资企业生产，缺乏用于内燃机测试技术的高精度传感器，特别是智能化传感器领域还是空白。随着市场的进一步发展，国内已出现一定数量规模的传感器生产企业，主要生产用于内燃机恶劣环境中工作性能参数的采集，如转速、压力、温度等参数。主要生产企业有武汉汉升汽车传感系统有

限责任公司、西安天厚电子技术有限责任公司、新会康宇测控仪器仪表工程有限公司、中航工业成都凯天电子股份有限公司等。

3. 排放测试设备

汽车排放控制技术越来越先进，有害物的排放也越来越少，其排放测试技术也随之不断提高。虽然单车排放量比以前大为改观，但是汽车保有量的不断增加致使机动车污染物排放总量却持续增长。随着排放法规的日益严格，机动车排放控制范围不断扩大，从新车到在用车、发动机台架到道路、传统汽车到清洁能源汽车、农用运输车及摩托车都有了排放控制法规，车辆污染物测试项目也不断增加。我国新轻型汽车的排放法规，从 GB 18352—2001《轻型汽车污染物排放限值及测量方法中国Ⅰ、Ⅱ阶段》到 GB 18352—2005《轻型汽车污染物排放限值及测量方法中国Ⅲ、Ⅳ阶段》，增加了低温下（-7℃）冷启动后排气中 CO 和 HC 排放试验，高怠速下的 CO、HC 和 CO_2 的排放测试，同时蒸发污染物排放试验增加了试验时间和模拟可变环境温度等。在此背景下，对内燃机排放测试设备提出了更高的要求。

目前，国内内燃机排放测试设备的智能化程度还较低，检测精度还不高，缺少高端竞争力强的产品，关键核心技术还受制于 AVL、HORIBA 等外资企业。主要企业有：天津科达动力测控技术有限公司，广州市福立分析仪器有限公司等。

4. 关键零部件性能与可靠性测试设备

为满足排放标准不断严格的要求，发动机核心零部件必须具有高可靠性和耐久性。零部件批量生产前，必须经过性能测试、台架测试和可靠性测试等重要测试环节。要加快发展内燃机关键零部件的测试设备，加快制（修）订满足高强度、低排放要求的关键零部件相关标准，降低关键零部件的研发成本，提高内燃机关键零部件的质量。

目前，我国内燃机关键零部件可靠性的测试设备主要由内燃机生产企业自行研发，水平不一，缺少专业的零部件测试设备生产企业。先进的内燃机零部件生产企业已基本采用零部件设计、测试、可靠性、试验设备同步系统开发的模式，与国外先进企业的零部件测试设备相比，我国零部件的设计能力较弱，试验设备还存在较大差距，主要体现在燃油系统、后处理系统、关键零部件测试设备的生产企业还不多，标准不够健全，部分关键零部件的可靠性测试设备还依赖进口。国内零部件测试设备生产企业主要有天津科达动力测控技术有限公司、苏州东菱振动试验仪器有限公司、机科发展科技股份有限公司等。

7.6.2 测试技术

内燃机测试技术为研制高水平的内燃机提供了重要的保证。内燃机技术的发展必然是内燃机测试技术发展的结果。电子管技术、晶体管技术、以激光为代表的光学技术大量应用使内燃机测试技术发生巨大的变化；计算机技术的广泛应用使得内燃机测试从内燃机稳态测试到内燃机动态测试成为现实。内燃机测试技术的发展，开拓了新的测试领域，提高了内燃机各类参数的测量精度，为研制更高水平的内燃机、满足现代动力工程的配套需求提供了重要保证。

内燃机测试技术的发展趋势具有以下特点：

1）随着信息技术的普及应用，内燃机测试技术产生了较大的变化，智能化、高速多通道数据采集处理、图像处理和各种场的采集测量与处理等测试技术，已广泛应用于内燃机台架试验台、排放测试装置、燃油系统中。

2）内燃机测试技术由常规测试向专项测试发展，由弱电测试向光学、磁学等测试发展，由接触测量向非接触测量发展，由一般测试向智能化方向发展，由稳态测试向动态测试发展，由普通测量向状态监控方向发展，已出现一批光学非接触转速、火焰等高速采集系统等测试设备和仪器。

3）内燃机测试技术向控制、智能等方向发展，涉及光学、核磁、自动化和模态分析技术等诸多学科领域。在内燃机缸内燃烧过程、整机振动模态分析、部件结构强度测试等领域中，以光电、微机技术为一体的技术已在内燃机产品的研发过程中得到了应用。内燃机测试技术的发展，为深入研究内燃机各方面的性能提供了手段。

1. 国外发达国家内燃机测试技术的发展

国外发达国家的内燃机行业在市场竞争和环境保护的双重压力下，其产品的综合技术水平有了很大提高。一方面是内燃机的研制开发对其测试技术提出了新的更高的要求；另一方面，测试水平的提高又为研制开发高水平的内燃机提供了可靠的保证。为此，国外各发动机科研机构和生产厂商都十分重视发展和完善各种测试技术，一批新的先进测试技术已进入实用阶段。

（1）动态测量技术　近年来内燃机动态测量技术已为国外发达国家内燃机行业广泛采用。目前，国外内燃机研究机构和生产厂家基本上都有先进的整机动态试验系统。德国申克公司新开发的 X- ONE 系列发动机试验系统可进行动态试验、车辆底盘试验和道路模拟试验 , 为内燃机排放试验配有标准的设备接口；HT 系列交流电力测功器采用新的变换技术，扩大了测功范围，增强快速响应能力；

AVL 公司最新开发的 PUMA 系列发动机试验系统，具有先进的动态、瞬态和道路负荷模拟模块，可再现实际试验工况。此外，各种高精度传感器、瞬态应变测量技术、热负荷模拟试验、模态分析技术、振动、噪声测量技术等也有了较大发展。瑞士奇石乐公司开发的新型压力传感器，广泛应用于内燃机缸内爆压及示功图的测量，误差小。AVL 开发的 QHT 石英，用于无冷却微型压力传感器，使传感器尺寸大为减小，满足了高水平燃烧和热力学分析所要求的精度。美国福特公司开发的激光加热试验台，利用了激光能量集中、加热速度快和光束可控可调的特点，作为热模拟试验的热源具有独特的优点。

（2）测试设备智能化　测试设备智能化是内燃机测试技术发展的重要特征。以计算机为基础的集高速数据采集、处理、分析和自动控制于一体的各种试验设备相继问世，功能越来越强， 应用越来越广泛 , 并不断向高精度、小型化方向发展。如 AVL845 故障诊断分析仪，通过测量高压油管压力波来检测发动机供油系统故障。

（3）燃烧过程测试技术　在内燃机进气、供油、燃烧、缸内过程、缸内传热、振动、油料分析、车辆动态转矩测量等诸多测试技术领域，以激光为代表的光学技术为内燃机测试提供了广阔的发展前景。

用于研究内燃机缸内现象的激光和可视化技术主要有激光多普勒测速法（LDV）、微粒图像测试法（PIV）、激光荧光法（LIF）、干涉法和全息法等。这些技术的应用，使内燃机缸内现象的研究向微观化、定量化和可视化方向发展，使过去一直被认为很难定量测量的瞬态喷雾浓度场、温度场、粒度场和速度场等分布问题的测量取得了较大的进展，为精确分析缸内燃烧现象提供了多种多样的测试手段。日本公司采用夫朗和费衍射法测量喷雾的粒径分布，特别是高温高压下蒸发油滴的平均粒径，采用 LDV 法测量气体流动和未燃气体温度；用层析法测定不对称油；采用位相多普勒技术（PDPA）同时测量非定常喷雾的平均粒度和液滴速度；用激光光片法和荧光法结合 CCD 摄像机和数字图像处理技术对油束内部结构进行可视化研究等取得了成功经验。美国威斯康星大学开展将瞬态热流传感器及光导纤维辐射热流量传感器应用于缸内过程研究。英国 Lucas 公司通过光强的变化来识别燃烧始点和终点的敲缸强度。

由实测示功图求得燃烧放热率，进而结合可视化技术、采样分析技术和数字计算方法等来了解和分析燃烧过程的进展情况，也是经常采用的测试技术。如激光光片法从喷雾火焰图像分析入手研究炭烟颗粒生成机理；用光导纤维观察缸内

燃烧，并用光谱法分析 NO_X 的生成，都为计算机模拟分析燃烧和排放成分的正确性提供了必要的补充依据。

（4）排放测试技术　随着排放法规日益严格，废气排放的检测已由稳态检测向动态检测发展，检测精度不断提高，并向小型多功能化发展。美国已将其排放检测标准改为瞬态法；排放标准也增加了部分瞬态法；日本 HORIBA 公司开发的 MEXA-7000 系列排放设备利用傅立叶变换红外分光法（FTIR）测量汽车排放，根据排放中各种成分对红外线的吸收程度不同，可同时分析 CO、CO_2、NO_X、甲醛、甲醇和氨等各种成分，非常适合于瞬态连续检测。奥地利 AVL 公司也推出了能满足排放法规要求的测试设备 CEB-Ⅱ，与其 PUMA 系列发动机试验系统相配套，也可进行瞬态连续检测。

（5）振动和噪声测试技术　在振动和噪声测量方面，国外利用选通声强法测量柴油机噪声，与普通声强法测量相结合，能确定工作循环中各分离过程的影响，这是传统测试方法无法实现的。丹麦 B&K 公司发展的空间声场变换（STSF）技术，提供了一种完整描述给定立体角噪声源的计算和测量方法；瑞典利用该技术进一步做出近声场全息图和进行声源衰减的模拟计算。美国新泽西州的 Dantec 电子公司开发了用于测量发动机及旋转机械轴的一系列光学非接触振动测量系统，包括扭振仪在内。RHLyon 和 GE 公司通过用加速度传感器采样，对旋转机械振动信号机械谱进行分析，以此来确定故障源。

试验模态技术是一种将完善的振动理论、精确的测试技术和计算机技术相结合的先进方法，为求得曲轴的动态特性提供了可靠的手段。有限元与模态试验相结合可以得到很精确的结论，再通过实机运行和动态测量进一步验证与优化计算结果。英国里卡多公司和 AVL 公司都在先进的噪声实验室利用模态分析设备进行降低噪声的研究，积累了丰富的经验。目前，国外噪声振动测试研究的重点正在转向模态分析、故障诊断、减振隔振和降噪隔声等方面。

（6）冷态测试技术　发动机的快速全面诊断越来越受到人们的重视，为更好地确保产品质量，越来越多的汽车生产企业，采用具有较快节拍、较高质量检测水平、较低生产成本的发动机冷测试来进行发动机下线的高精度检测。发动机冷试验是用来检测内燃机装配质量的一种方法。当采用冷测试技术检测发动机时，发动机不需要燃料来运行，也不需要冷却液进行冷却。被测试的发动机进入测试台，通过气缸或液压缸夹紧发动机的进气、排气口，同时通过专用机油压力适配器连接到设备上，用抱爪或其他夹紧机构自动夹紧发动机的飞轮或适配器，测试

台的伺服电机驱动发动机以不同的速度旋转，与此同时，测试系统通过数据采集卡同时从发动机进气口、出气口、夹紧机构的转矩传感器以及主油道出口的压力传感器上采集数据，采集到的测试数据通过测试台专用软件进行分析，然后将分析结果与测试台已设定好的极限值进行比较，从而确定发动机是否被正确装配。

由于发动机冷测试不像常规的热试验那样能够真实地表现发动机的功率和转矩，而是通过间接的方式考察整机装配性能，在测试过程中更多地涉及各种参数及曲线的分析，因此，在发动机冷试验过程中，测试项目及测试方案的选取相对而言就显得尤为重要，需要在实际生产中通过实践验证及不断调整来最终确定。

2. 国内测试技术发展现状

随着市场经济的不断发展和国际先进内燃机测试技术的发展，我国内燃机测试技术也取得了长足的进步。表现在通过引进、消化吸收和自行研制开发相结合，紧跟国际内燃机测试技术的发展方向，形成了一批以高等院校、研究所和企业为主力军的测试技术研制开发队伍，建立了我国内燃机测试技术的研究、 教学、生产专业化体系。

（1）基本测试设备国产化　目前我国内燃机测试仪器、设备的研制开发，专业技术瞄准国际先进水平不断创新，已能完整开发生产各种发动机控制台及试验数据分析处理系统。我国内燃机测试设备企业与高等院校合作开发了热冲击发动机试验台、气道试验台、曲轴疲劳试验机等用于专项试验的测试设备，中国北方发动机研究所研制开发了爆发压力测试仪、增压器转速传感器及各种控制仪表等。

（2）排放测试设备已初具规模　发动机排放和噪声振动的研究在国内已得到重视，国标 GB 5714 中已规定了烟度的检测方法；通过引进的设备主要有美国贝克曼公司、日本 HORIBA 公司、英国克森公司和 AVL 公司的产品。国内已开发一些便携式排放检测仪和相配套的发动机试验台、转鼓试验台等。

存在问题主要表现在：测功器是内燃机测试技术的最基本设备，大功率水力、电涡流、交流测功器在国内市场上仍是空缺。用于动态试验的高频响测功器仍是空白。以激光为代表的光学技术虽然在内燃机测试技术领域已得到广泛的应用，但仪器、设备的关键部件仍依赖进口，大型瞬态排放分析系统国内尚不能生产。还需要进一步加强基础测试技术的研究开发，加强对引进技术的消化与吸收，加强技术队伍建设。

7.7 燃料及应用

我国的资源状态是“缺油、少气、相对富煤”，目前石油对外依存度已接近60%（国际公认的能源安全警戒线50%）。近几十年来，我国政府高度重视开发石油替代能源，一方面积极推动内燃机节能环保技术的进步，另一方面也努力推动替代燃料的发展。目前天然气在内燃机上已经得到了广泛应用，天然气内燃机已经发挥了重要作用，每年替代石油超过1 000万t。乙醇每年有近200万t掺入汽油，甲醇每年有近500万t用在内燃机上，生物柴油、二甲醚等替代燃料也得到了一定的应用，逐步构建了石油燃料为主、天然气和醇类燃料为辅的燃料格局，形成了我国替代燃料内燃机的多元化特点。

7.7.1 石油类液体燃料的应用现状及其研究

石油类液体燃料的使用由来已久，主要是指汽油、柴油，目前仍占据着内燃机燃料的主导地位，随着对内燃机性能和排放要求的提高，对这些传统燃料提出了更高的要求。对汽油的研究主要集中在提高其辛烷值方面，对柴油的研究则集中在降低其含硫量，以及通过燃料调质改善其燃烧特性降低排放方面。

1. 提高汽油辛烷值

自从我国停止含铅汽油的使用以来，甲基叔丁基醚（MTBE，Mechanism of T-Butyl methyl Ether）是中国目前在用的主流汽油抗爆剂。MTBE不仅辛烷值高，还可提高汽油含氧量，稀释汽油中的芳香烃等不易完全燃烧的毒性物质，从而使燃烧更清洁。另外其生产成本低，不易挥发使得储存运输较为方便。自从1979年在美国开始使用以来已经有30多年的历史。然而，1999年在美国发现埋藏在地下的储油罐可发生轻微泄漏，而MTBE易溶于水且扩散速度快，可造成地下水污染，微量的MTBE即可使饮用水出现难闻的味道。另外人体健康研究机构研究表明，虽然微量的MTBE是无毒的，但大量的MTBE却有致癌的作用。因此MTBE在美国已禁用，在西欧也逐渐限制使用，但在亚洲和中国，一方面汽油的贮存方式与美国不同，另一方面其他抗爆剂如乙醇、ETBE（乙基叔丁基醚）因生产和成本问题尚无法大规模应用，MTBE还将使用相当长的一段时间。在这样的现状下，研究重点既要放在预防MTBE进入地下水以及使之生物降解方面，同时也要积极对MTBE换代产品进行研究。

乙基叔丁基醚（ETBE，ethyl tertiary butyl ether）是一种MTBE的代用产品，生产原料由MTBE的甲醇变为乙醇，其成本比MTBE和乙醇都要高，但其水溶性比MTBE差，具有不易污染地下水、挥发性和吸水性比乙醇弱的优点，故在西欧

和日本受到欢迎。目前在西欧的 MTBE 生产装置已逐渐转为生产 ETBE，但在中国由于价格和原料来源的问题，ETBE 还没有进行试点应用。

乙醇（ethanol）是一种历史悠久的内燃机燃料。近些年来，由于乙醇的高辛烷值、无毒、制取容易、燃烧清洁完全以及由生物发酵获得、对环境友好的特点，在 MTBE 的使用受到抵触后，乙醇一跃成为一些国家（如美国）理想的汽油抗爆剂。最近的基础研究结果表明：醇燃料抑制爆燃的机理与 MTBE 及异辛烷有相似之处，即这些燃料均没有或有很弱的低温链分支反应，同时通过燃料脱氢消耗着火过程中重要的羟基，从而对羟基的增长起到负面作用。我国在部分地区也使用酒精加入汽油形成酒精汽油，添加量为 10%。

上述的这些提高汽油辛烷值的方法均是添加含氧燃料，但这些添加剂对汽油性质的改变或环境均有一定的负面影响。在中国，有超过 70% 的汽油是通过催化裂解生产的，其烯烃的含量是发达国家的两倍。过高的烯烃含量使油品的化学性质不稳定，也影响了辛烷值的提高，同时其蒸汽压较高，增加了发生气阻的可能性，而加入含氧添加剂后尽管辛烷值提高，但其他缺点并未真正克服；因此对汽油进行烷基化，即在炼油的过程中使用催化剂，将烷基引入小分子烯烃和侧链烷烃形成更大分子量的侧链烷烃是提高燃料辛烷值，增强燃油稳定性，降低蒸汽压的根本解决途径。虽然各地出现了一些烷基化装置，但这些装置由于成本的问题及使用强酸催化剂，如硫酸、氢氟酸造成的设备腐蚀的问题尚未解决，一直处于半开半停的状态，石油公司的抵触也使得烷基化进程举步维艰；因此达到发达国家的标准还有较长的路要走。目前对烷基化的研究重点主要集中在强酸催化剂上，若要从根本上解决对设备的腐蚀问题，需摒弃传统液态酸催化剂，转向对固体酸催化剂的研究。

2. 降低汽柴油含硫量

燃油中的硫不仅会造成 SO_2 的污染，还会缩短发动机使用寿命，特别是对满足国Ⅳ及其以上排放法规的内燃机，其后处理系统中的催化剂易于受到硫化物的损害，引起催化剂中毒，甚至造成催化剂失效。另外，燃烧中生成的硫酸盐会造成发动机零部件如缸套的磨损和腐蚀。由柴油机排出这些硫酸盐还会沉积在微粒捕集器的表面，造成过滤孔的堵塞，从而阻断排气。因此对于带有后处理装置的满足国Ⅳ以上内燃机，如使用含硫量过高的油品，不但达不到既定的目标，还会影响发动机正常工作。

高标号油品的含硫量低，但推广应用高标号油品的主要阻碍是成本的原因，

且多标准燃油同时使用，容易造成油品市场鱼龙混杂，监管困难，减弱了政策法规的约束力。目前主要采用的脱硫技术是加氢脱硫，但其成本大，能耗高（脱硫原理是加氢生成硫化氢，氢气靠电解水或水蒸气生成合成气产生，能耗高），出于对成本的担心未有效利用。另外，我国油品生产大约有四分之一来自地方炼油厂，这些生产企业在产品的生产一致性和质量控制方面存在一定难度，将会给今后的油品达标生产带来一定的困难。但脱硫产物硫化氢是一种有价值的工业初级产品，可继续发展下游产业，若能实现脱硫厂的循环运作也可降低成本。另外开发成本低的脱硫技术是研究热点，包括吸附脱硫、氧化脱硫、生物脱硫及膜脱硫等。

目前全国大部分地区执行的是国Ⅳ标准，即规定汽油、柴油中含硫量不超过50 mg/L。在部分地区，北京、上海和广州执行相近于国Ⅴ标准的油品，即燃油中含硫量不超过 10 mg/L。石油生产部门已经确定，2017 年全国全面实施国Ⅴ油品的市场供应。

3. 含氧添加剂改善柴油烟度及其燃料经济性

含氧燃料包括醇类，如甲醇、乙醇；醚类，如二甲醚、过氧甲基二甲醚；酯类，如甲酯、乙酯。这些燃料可以单独应用，也可与传统的石油基液体燃料掺混燃烧，达到合理利用代用燃料的目的。在与柴油掺混燃烧中，均发现柴油机烟度有不同程度的改善。在醇类燃料与柴油掺混燃烧或被柴油引燃的发动机台架试验中发现，烟度改善较为明显。通过近期的台架试验和基础研究结果，发现主要有以下几个原因：

1）含氧燃料本身不易生成碳烟，由于燃料中碳氧键的存在，使得碳—碳键的聚合困难，不易形成大分子碳烟。

2)含氧燃料的加入稀释了柴油，降低了柴油中碳烟前驱体结合成碳烟的几率。

3）在易形成碳烟的过浓区域，含氧燃料以自由基的形式释放出氧原子，使得更多的柴油转向氧化方向而非过度脱氢然后聚合。

4）醇类燃料具有较大的气化潜热，在与柴油掺混时，可使浓区温度下降，抑制了高温烃类过度脱氢的进行，从而达到降低碳烟生成的目的。

另有研究表明，在醇类燃料与柴油掺烧的实验中发现发动机热效率也有所提高，其原因是醇类推迟了柴油的着火，促使柴油与空气预混时间更长，燃烧放热时间缩短，减少了热损失。

目前美国使用的乙醇含量约占新配方汽油的 8% 左右，且在逐年增加；巴西

作为使用乙醇最早的国家，目前乙醇汽油中乙醇含量已达到 20%。但是，乙醇汽油在使用上也受到一些诟病，如汽化潜热大造成冷启动困难，排放恶化，热值低使得动力性下降；由于其沸点低，温度升高时还会气化产生气阻，造成断油，长时间放置易吸水分层等等。故在发展乙醇汽油燃料的使用上，需正确引导原料来源（鼓励使用秸秆、木薯等非粮生物质）和运输储存及使用方法。

7.7.2 气体燃料的应用和研究

目前气体燃料在我国得到快速的应用和推广，其中主要是天然气（NG，Natural Gas），液化石油气（LPG，Liquefied Petroleum Gas），煤层气以及沼气。天然气的能量密度低，在内燃机上应用一般是以压缩（CNG，Compressed Natural Gas）或液化（LNG，Liquefied Natural Gas）方式使用。CNG 由于燃料体积密度的问题一般应用于对续航要求不高的公交车、出租车及固定动力装置如发电机组。LNG 一般应用于对里程要求较高的重型商用车上。截止到 2014 年，全国天然气汽车保有量突破 300 万辆，位居世界第五。其中，CNG 车 270 万辆，LNG 车 10 万辆，LPG 车 10 万辆。LNG 车发展最快，主要是重型载货汽车。加气站有 5 000 多座，其中 2 200 座为 LNG 加注站。

1. 天然气（NG）

其应用方式大致有两种，一是火花塞点燃，二是柴油引燃。国内外对缸内直喷 LNG 燃烧方式也开展了研究，但是目前尚未见产品应用。火花塞点燃是目前应用天然气的主要模式，为了弥补气体燃料对充气效率的影响而造成功率下降，同时为了提高热效率，针对天然气辛烷值高的特性，常采用较大的压缩比及进行进气增压中冷。另外，与汽油相比，与京 V 相比，燃用 CNG 的总 HC 减少 34%，非甲烷碳氢减少 50%，CO 减少 70%，NO_X 降低 80%，PM 降低 83%。CO_2 可以减少 7% ～ 8%。然而，由于天然气的燃烧速度较慢，燃烧温度较高，NOx 排放也随之升高，解决的办法是采用稀燃。稀燃应用在汽油机上的研究已经广泛开展，证明其有提高热效率，降低 NO_X 的作用，同样在天然气机上也有相同的应用效果。另一个办法是采用废气再循环（exhaust gas recirculation, EGR），降低燃烧温度，从而减少 NOx 排放。然而这两种方法都造成发动机循环变动过大，甚至失火，同时 HC 和 CO 排放恶化。在天然气中混氢，以提高火焰传播速度，同时全面改善排放的方法受到一定的重视。由于目前氢气作为车用燃料实际应用很窄，故目前仅处于研究阶段，实际上改善排放目前还是采用后处理装置。

另一种应用方式即采用柴油引燃法，这种柴油 / 天然气双燃料发动机是目前

应用较为广泛的双燃料发动机，已经有相当数量的产品投放市场。这种发动机既可采用双燃料模式也可采用柴油单燃料模式，具有燃料在线配比柔性控制的优势，相比于纯柴油模式，其烟度、NOx 和 CO_2 都有较大幅度的降低，而未燃 HC、CO 的排放则有所上升，主要原因是火焰难以引燃在狭小空间或有激冷面处的天然气。另外，压缩天然气喷入进气道后膨胀吸热，降低了进气温度，即使引入热的 EGR 后，但是由于天然气的化学反应机制及进气温度降低的物理抑制作用，使得柴油的滞燃期延长，使后续放热集中，提高了燃烧等容度。故相比于纯柴油模式，其热效率也有所上升。

为了提高柴油引燃天然气的燃料效率，优化燃油喷射系统是目前的研究重点之一。由加拿大 Westport 公司和潍柴动力联合推出的柴油高压直喷引燃天然气技术（HPDI），采用一种天然气—柴油复合喷嘴，其中大针阀控制天然气喷射，大针阀中还嵌套着一个小针阀，控制柴油的喷射，如图 7-5 所示。这种设计实现了柴油与天然气的良好快速混合，再通过优化燃烧室结构、采用高压共轨喷油、EGR 等措施使得各种排放物均有所降低。与此同时，新型高压 LNG 车载燃料罐也得到了配套设计以保证续航里程。不过总体成本目前尚难以为市场接受，故进气道喷射仍然是目前的主流。

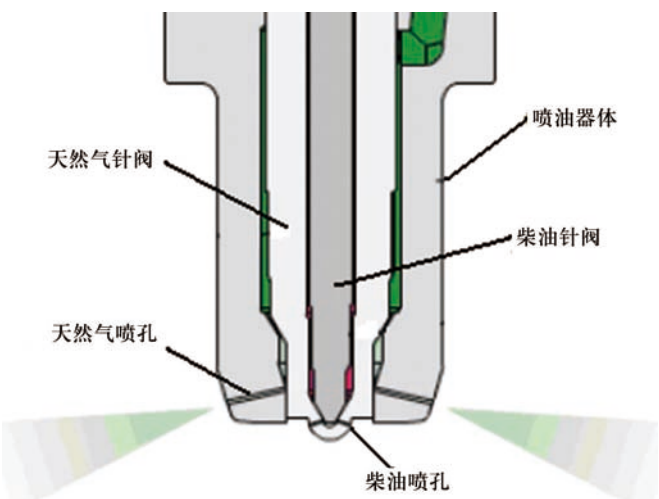


图 7-5　Westport 公司开发的柴油—天然气双燃料喷嘴

2. 液化石油气（LPG）

液化石油气是一种由丙烷和丁烷组成的气体燃料。与天然气相比，其组成分子的碳原子多，故沸点高于天然气，易液化，因此储存上较天然气方便。但 LPG

是石油基燃料，因此其价格和产量均受石油的影响，天然气则保持了一定的独立性。除此之外，其燃烧与排放特性，以及应用方法与天然气相差不大，也可由火花塞点燃或柴油引燃，故一般仅在城市公交、农用机械及发电机组使用。目前的LPG发动机大多数是在原有的汽油机或柴油机基础上改造的，但与天然气发动机相比，由于价格较高，应用前景较差。目前针对LPG的研究与针对CNG的研究类似，其燃烧与排放特性也与CNG相差无几，火焰稳定性强于天然气，但研究的力度和应用面均不及CNG。

3. 煤层气和沼气

煤层气和沼气的可燃成分与天然气一样均为甲烷，但由于其甲烷含量较低，且体积分数不稳定，过去一直认为是两种贫气而主要用在加热取暖方面。近些年来，随着能源的日益紧张，以及开采生产技术的提高，这两种低品位燃料也渐渐应用到发动机上来。我国的煤层气储量丰富，居世界第三位，因为煤层气具有一定的价格优势，局部地区将其应用到公交车、出租车及固定装置上。煤层气可以视为稀释了的天然气，应用在发动机上，除了NO_X排放较天然气低外，CO及HC排放均高，同时充量系数相比于天然气还有下降，造成发动机动力性较燃烧汽油时更低。最主要的问题在于，由于甲烷的火焰传播速度低于汽油，燃点高于汽油，故需要较大的点火能量，而稀释了的甲烷则需要更高的点火能量，且火焰传播速度更慢，循环变动更大，加之煤层气中甲烷含量在不同地区不同批次的产品中变化很大，可从30%变化到80%，更加剧了燃烧中的不确定性。故降低循环变动，稳定燃烧是煤层气发动机亟须解决的问题。

沼气是一种生物发酵产生的甲烷、CO_2，及少量的硫化氢、氮气、氢气等的混合体，其中甲烷含量大约占50%～70%。与天然气和煤层气相比，燃烧沼气不会产生温室效应，是一种可再生能源，应用前景较为广阔。沼气通常就地使用，作为污水处理厂、垃圾处理站、偏远供电困难地区的发电燃料。在欧洲，沼气发电还并入电网，达到了真正的废物利用。与天然气相比，沼气燃料品位较低，与煤层气具有相似的燃烧和排放特性，但其硫含量要高于煤层气和天然气，硫化氢含量大约为1%～3%，故要做到清洁燃烧，减小对发动机的损害，必须加装脱硫装置。尽管如此，沼气在节能环保方面具有其独到的优势。煤层气和沼气目前均只能在局部地区得到应用。

4. 醇醚类燃料

目前内燃机上应用的醇醚类燃料主要包括甲醇、乙醇及二甲醚。醇类燃料具

有高辛烷值的特点，故主要靠火花塞或高十六烷值燃料如柴油点燃。二甲醚具有高十六烷值，应用在压燃式发动机上。醇醚燃料的共同特点是含氧，故在燃烧时有利于降低碳烟排放。

在醇类燃料中，最开始得到广泛应用的是乙醇。因为来自淀粉类生物质发酵生成，乙醇最早作为燃料使用。我国在 2000 年前后为了消化陈化粮，大力发展乙醇作为替代燃料。后发现陈化粮并没有想象中的那么富余，我国可耕地面积不多，而生产乙醇相当大程度上依赖于粮食，如玉米、高粱，故发展的空间较小。2006 年 12 月国家发改委发文严令禁止再上以粮食为原料的乙醇项目。此后便限定国内的安徽丰原、河南天冠、吉林的榆树和黑龙江华润共四家企业生产，后来广西上了木薯制乙醇的项目。目前全国乙醇总产量不过 200 万 t。掺入汽油制成含 10% 乙醇的酒精汽油（E10）在汽车上应用。

甲醇是最简单的醇燃料，其来源广泛，可由天然气、煤炭、焦炉气，甚至生物质气合成生产。我国是全球最大甲醇生产国，产能超过 6 000 万 t。产量超过 3 000 万 t，超过全球产量的一半。我国的甲醇生产原料有近 20% 来自焦炉气，这种气体通常作为炼焦过程中的废气，生产甲醇使其得到高效利用。另有 20% 来自天然气，剩余 60% 甲醇部分来自劣质煤炭。这些煤炭含硫量高，既不能用作炼钢，又不能发电，但是生产甲醇很合适，既制得甲醇，又得到重要的硫磺原料。我国内燃机行业应用甲醇的历史较为久远，应用面也很广。我国内燃机应用甲醇始于 20 世纪 70 年代的第一次石油危机。当时的国家科委委托部分大学和中科院工程热物理研究所与德国大众汽车公司、美国福特汽车公司合作开发甲醇汽车。此后，随着石油供需矛盾的缓和，甲醇的应用仅限于国内部分甲醇产区，如山西、陕西等地。近年来，随着我国甲醇生产技术的逐步成熟，甲醇产量逐步增大，甲醇作为内燃机替代燃料发展很快。目前每年约有 400 万～ 500 万 t 甲醇被作为车用燃料消耗，成为甲醇产品重要的用途之一。甲醇应用区域现在已扩展到除西藏、广州等少数地区外的所有地区。据不完全统计，甲醇车辆保有量达 150 万辆，年替代石油燃料 200 万～ 300 万 t。

甲醇辛烷值高达 110，性质接近汽油，应用方式与天然气相似，在点燃式内燃机应用方便。甲醇的点火能量小于汽油和天然气，故可缩小燃烧循环变动。另外，甲醇火焰传播速度约两倍于天然气，高过汽油，甲醇的加入降低了燃烧温度（因其气化潜热大，热值低），从而可以降低 NO 排放。与天然气不同，甲醇对进入气缸的新鲜空气充量影响较小，由于其较高的气化潜热降低了进气温度从而增加

进气中含氧量，用在改装过的高压缩比柴油机上还能提高热效率。因此，甲醇在点燃式内燃机上，一般采用掺烧的方式，如掺 15% ～ 35% 甲醇制成 M15 ～ M35 的甲醇汽油。甲醇在掺入量较少时，一般不需要添加剂，可以直接掺到汽油中，但是超过 10% 时一般需要加入添加剂，以防甲醇吸水后分层。如果采用掺 85% 甲醇的甲醇汽油（M85）或纯甲醇（M100），内燃机需要改动。后者通常采用汽油点燃，暖车后转为 M100 运行。

但是由于甲醇不易压燃，要将甲醇应用到压燃式内燃机上需要在燃烧方式上做些改变。主要分为两种方式：

一是在乳化剂的作用下与柴油掺混燃烧，这种方式不必对发动机进行改动，燃料供应系统简单，同时有效降低碳烟和 NO 排放，但冷启动差，经常需加十六烷值增进剂（基本上是硝基化合物，不利于 NO 排放），燃料适应工况较为被动。更重要的是即使在乳化剂的作用下长时间放置也会造成醇油分层。

另一种方式是甲醇预混空气进入气缸，在压缩终点附近由柴油引燃。这种方法解决了甲醇不易压燃的困难，引起国内外普遍重视，开展了大量的研究。但是解决这种燃用甲醇发动机的冷启动问题，一直没有很好的方案，致使国际上没有甲醇在压燃式发动机上应用的实例。

天津大学提出的“采用纯柴油起动，发动机充分暖机后转为柴油甲醇双燃料运行”的组合燃烧技术成功地解决此难题。该方法克服了乳化法、点燃法等缺点，在发动机上只需加一套甲醇低压燃油供给系统即可。甲醇的喷射时刻和喷射量由电控单元管理。该电控单元与发动机的控制系统实时协同管理甲醇和柴油的比例，具有燃料控制灵活（中小负荷使用甲醇柴油，大负荷使用纯柴油）的优点。可通过燃料的在线实时配比达到需要的燃烧路径和燃烧状态，局部实现可控的 HCCI 燃烧，大幅提高了热效率，同时通过甲醇的比例控制燃烧温度和柴油当量比分布区域，可同时避开 NO 和碳烟生成区，加之甲醇本身无碳烟生成及其自供氧能力，使得碳烟可以达到更低的水平。该技术的应用与普通柴油机相比，仅 HC 和 CO 排放偏高。但是，这些排放物可以通过采用氧化催化器（DOC）予以消除，部分工况的整机热效率还是高于柴油机。醛类等非常规排放是燃用甲醇后最重要的有害排放物，使用 DOC 能将其中大部分氧化，使其排放完全达到与柴油机相同的水平。由于甲醇对某些材料具有一定腐蚀性，甲醇燃料供给系统的涉醇部件以及润滑油需要采用该技术专用的产品。该技术已经在全国众多地区试验应用，包括陕西、山西、新疆、甘肃、内蒙古、河北、天津、上海、江苏、贵州、云南、黑

龙江等地。历经春夏秋冬四季的酷暑和严寒（最低环境温度 -29℃）考验，甲醇对柴油的替代率平均超过 30%，替换 1.0L 柴油仅需 1.47L 甲醇，整车的燃料经济性得到显著改善和提高。由于我国甲醇产量大、价格低的优势，即使在柴油价格一低再低的情况下，采用柴油甲醇双燃料燃烧系统的车辆仍然具有较普通柴油车突出的经济优势。该技术在 2012 年被工信部认定为甲醇车试点的柴油机主要应用的技术方法，国务院办公厅颁发的《关于加强内燃机节能减排的意见》也将此技术列为甲醇替代柴油的首选。2015 年 6 月，该技术已经通过国家工信部组织的专家鉴定，被与会专家认定为国际领先水平。图 7-6 为柴油引燃预混醇类的柴油机。

图 7-6　柴油引燃预混醇类的柴油机

5. 二甲醚

二甲醚（Dimethyl ether），简称 DME，十六烷值高达 70 个单位，超过柴油，容易压燃。自身无毒、含氧燃料，常温常压下为气态，常温下五个大气压下可液化，易于储存与输运。二甲醚可以由甲醇脱水间接制取，大约 1.45 份甲醇制取一份二甲醚。直接生产二甲醚目前技术尚不成熟。

二甲醚是一种研究历史不超过 20 年的柴油机代用燃料，虽然研究历史短，但取得了很大的进展。其十六烷值高于柴油，可用于中国目前占运输业主导地位的压燃式发动机。其制取主要来源于甲醇，成本低廉，克服了甲醇的毒性和腐蚀性。发动机燃烧试验表明燃烧过程中不会产生碳烟，同时燃烧温度低于柴油，故 NO

生成也较低。CO 排放较柴油略高，但 HC 却低得多。由于柴油机本身 CO 和 HC 排放就比较低，故在不采用任何后处理或缸内燃烧控制技术即可达到欧Ⅲ排放标准。结合其他技术如引入 EGR、增加后处理装置等可以满足更严格的排放法规。北欧国家比较积极采用生物质生产二甲醚，用于载货汽车和客车，从欧盟的观点看，采用生物二甲醚未来的前景较乐观。但在中国的运行结果似乎对此不支持。其主要原因主要是：

1）二甲醚是气体无润滑性，缸内直喷时针阀偶件的磨损太大，且其供油特性与柴油相比相差很大，故不能在现有的柴油机供油系统上直接应用，对供油系统的改造难度较大。目前有一个研究方向是将二甲醚压入柴油进行掺烧，如此便避免了润滑和供油特性的问题，但同时需要较复杂的燃料供给装置，且高压油管中可能出现气阻问题。

2）二甲醚的物流配送较难，没有专用输送管网，主要靠公路罐车运输。由于是气体，极易燃，故危险性较高，风险大，一旦发生交通事故造成运输车或使用车罐体破裂，后果不堪设想。另外，供应链缺失严重，大大增加了成本。

3）政策法规的缺失，对二甲醚作为车用燃料尚无详细标准可循。

6. 生物柴油

生物柴油是目前研究最为广泛的新型燃料油。与煤制油和气制油相比，其最大的特点是纯绿色，不会产生二氧化碳排放。而与柴油相比，生物柴油没有柴油中致癌的芳香烃和有害的硫元素，且可与柴油随意互溶并直接应用于柴油机上，若有泄漏还可直接生物降解，是一种环保的可再生能源。生物柴油在生产中有酯交换流程，若采用甲醇作为交换剂则生成甲酯，采用乙醇则生成乙酯，由于乙醇成本比甲醇高的多，大部分生物柴油都生成甲酯。

欧洲开展生物柴油的研究与应用由来已久，已是全球生物柴油的主要产地。德国目前已拥有 8 个生产生物柴油的工厂，300 多个生物柴油加油站，法国、意大利等欧洲国家都建立生物柴油的生产企业，其使用的标准是在普通石油柴油中添加 5%的生物柴油。各国生产生物柴油的原料各不相同，如欧洲使用菜籽油，美国主要使用大豆油并正大力研制工程微藻生物柴油，巴西使用蓖麻油，日本使用餐饮废油，地处热带地区的泰国和马来西亚则使用椰子油和棕榈油。图 7-7 所示为生物柴油的生产来源及单位面积的产量。

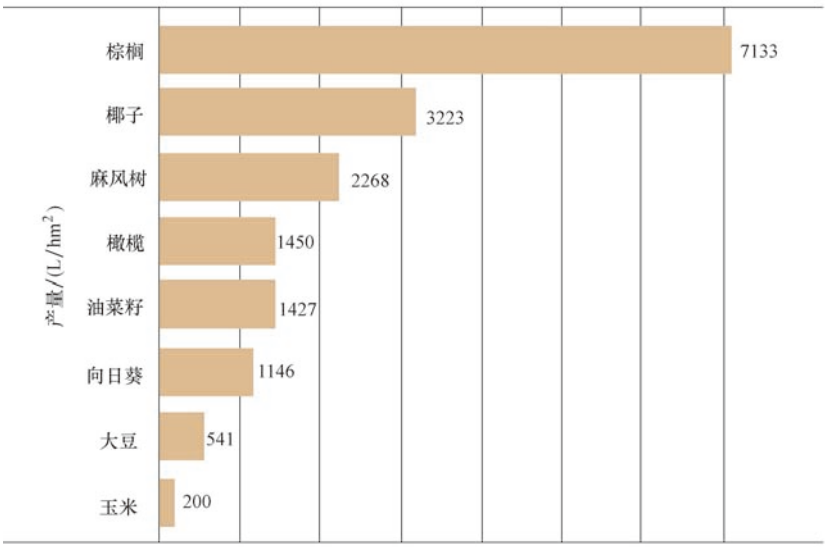


图 7-7　生物柴油的生产来源及产量

我国的生物柴油生产因制取的原料作物种植受到限制，比较有发展潜力的植物有黄连木籽油、小桐子油、麻风树等生长在南方的植物，然而生产成本还较高，因此目前具有初步规模生产的主要以餐饮垃圾油为原料。大量的试验研究表明，发动机应用生物柴油后的性能基本与矿物柴油相当。由于生物柴油的十六烷值较柴油高，其滞燃期短，故燃烧等容度会小于柴油，造成一定工况下发动机热效率的降低，同时，生物柴油的热值较柴油低，动力性也会降低。但排放方面，生物柴油本身含氧，不含芳烃，故碳烟排放大大好于柴油，同时燃烧充分，HC 和 CO 排放也优于柴油。但 NO 排放尚存在不一致的结果。总而言之，生物柴油的排放性能要好于柴油，且无硫的困扰。

7. 煤制油和气制油

煤炭制油分直接法和间接法。我国神华集团采用的是直接法，目前已达工业规模。直接法煤制油的品质着火性不如柴油，一般掺入柴油使用。间接法采用 F–T 法，即首先以煤炭、天然气、水蒸气为原料制取氢气和 CO，之后在催化剂的作用下将氢气和 CO 合成为长链烷烃或烯烃。间接法煤制油的品质较高，但是价格较高，市场竞争力较差。此外，煤制油对煤质要求苛刻，生产过程耗水量大。因为煤资源丰富地区，一般水资源较缺少，而且环境较为脆弱，因此煤制油在目前主要作为战略技术储备。

7.7.3 结束语

针对内燃机的燃料现状和对未来的展望，可以看出，内燃机的燃料将主要集中在石油、天然气和甲醇。其他的燃料如乙醇、煤制油将会在一定程度作为一种补充。总体情况大致是：

第一，石油燃料将在未来相当一个历史阶段仍旧作为内燃机主要燃料。未来对石油燃料的改进仍然围绕提高汽油的辛烷值和降低柴油的硫含量开展。

第二，天然气在替代燃料发展已经具有一定的规模。相比较国际上天然气车辆发展水平，我国还有较大的发展空间。但是，在天然气燃料应用中也存在潜在问题，包括资源、管网、价格等方面压力。根据计算，如果天然气价格达到石油价格的 75%，则天然气车的发展积极性就会消失。另外，迫于雾霾的压力，京津冀、珠三角和长三角地区大量“煤改气”和“油改气”改造，对天然气资源的需求，会影响这些地区的天然气车应用。但是无论如何，在产气区，如四川、新疆等地，天然气车还会得到适度的发展。

第三，甲醇燃料会有适度的发展。特别是柴油车使用甲醇，既可以降低燃料费用，又可以提高燃料燃烧效率，减少 CO_2 排放，特别是降低柴油车的颗粒物排放具有很好的推广应用前景。甲醇作为改善柴油车排放的添加剂使用，会在未来的发展中获得一个很好的发展空间。

7.8 内燃机再制造

再制造是指以机电产品全生命周期理论为指导，以废旧机电产品实现性能提升为目标，以优质、高效、节能、节材、环保为准则，以先进技术和产业化生产为手段，对废旧机电产品进行修复和改造的一系列技术措施或工程活动的总称。再制造的重要特征是再制造产品的质量和性能不低于或超过原新品。

未来 3～5 年内，全行业要形成 40 万台以上各类内燃机整机再制造生产能力，3 万台以上规模的整机再制造企业 8 家，3 万台以下规模的整机再制造企业 10 家以上；增压器、发电机、起动机、机油泵、燃油泵、水泵等关键零部件规模化配套企业 35 家以上。建立一批乘用汽车、商用汽车、工程机械、农业机械、发电设备、船舶动力、石油机械、铁路机车等内燃机再制造示范工程。初步建立全行业旧件逆向物流体系，一批核心企业建成旧件回收网络系统。再制造成形及检测等共性关键技术在行业内广泛使用，内燃机再制造工艺、技术及装备达到国际先进水平。

7.8.1 内燃机再制造产业现状

再制造是循环经济“再利用”的高级形式。再制造与制造新品相比，一般可

节能 60%，节材 70%，节约成本 50%，大气污染物排放量降低 80% 以上。发展再制造产业是推动产业结构升级、发展战略性新兴产业的重要内容，是建设资源节约型、环境友好型社会的客观要求。基于此，《中华人民共和国循环经济促进法》《国民经济和社会发展第十二个五年规划纲要》《“十二五”节能环保产业发展规划》和《循环经济发展战略及近期行动计划》中均明确将再制造列为循环经济的重点工程之一。

加快发展内燃机再制造产业，将有力推动我国内燃机产业进一步转变生产方式，从“大量生产、大量消费、大量废弃”的单向型直线生产模式向“资源－产品－失效－再制造”的循环型产业模式转变，有利于加快推进行业技术进步和产品更新换代，提升产业可持续发展能力，引导形成节约型、循环型的生产方式和生活方式。实施内燃机再制造是当前内燃机工业面临的一项艰巨而紧迫的任务，对提升我国产业竞争力、促进内燃机制造行业持续发展、推进节能减排具有重要意义。

1. 国外再制造产业情况

发达国家再制造产业已有几十年历史，对其可持续发展做出了重要贡献。美国、欧洲等国家或地区的再制造产业不仅在旧件回收、生产工艺和加工制造设备、销售和服务、技术标准等方面形成了一套完整的体系，而且形成了较大的规模。以美国为例，其再制造领域涉及汽车、航空、工程机械等多个行业，年再制造产业产值约 500 亿美元，提供超过 18 万个工作机会。近年来的统计表明，美国再制造产业发展速度更是以每年 15% 的速度递增，2011 年再制造产品出口额达到 117 亿美元，两年内增长达到了惊人的 50%。

美国的再制造产业已经达到较大规模。发动机及其零部件再制造行业有 5 万家以上的公司，同时陆续形成了多个再制造协会，为用户提供了完善的信息沟通及共享平台，比较著名的有 AERA、AARA、APRA、ARA、PERA 等。美国联邦贸易委员会颁布了《再制造、翻新和再利用汽车零部件工业指南》，环境保护署颁布了《再制造材料建议公告》，美国汽车工程师学会 SAE 针对发动机及其零部件的再制造制定了系列相关标准。

日本 2005 年开始实施《汽车回收法》，如日产汽车早就开始再制造生产，再制造品售价是新品的 60%[1]。

欧洲的汽车再制造水平也很高，汽车零部件回收利用率 90% 以上。德国大众公司回收的旧发动机中 94%的零部件经过再制造工艺可以被高技术修复，5.5%可用于回炉再生，只有 0.5%被填埋处理。英国的再制造产业也越来越受到重视，保

守估计，其再制造产业规模目前为 24 亿英镑，而其潜力可轻松达到 56 亿英镑[2]。

欧美内燃机及其相关零部件的再制造产业模式主要包括 OEM 制造商再制造、OEM 授权再制造、第三方独立再制造等多种模式，尤其是第三方再制造规模很大，专而精的中小企业众多。

欧美和日本等工业发达国家和地区在再制造工业生产中，主要采用换件法和基于机械加工方法的再制造成形技术（即尺寸修理法）进行，因此，其再制造产品质量和技术标准也一般直接采用制造标准。如英国 Lister Petter 再制造公司，每年为英国、美国军方再制造 3 000 多台废旧发动机时，对于磨损超差的缸套、凸轮轴等关键零件一般予以更换新件。美国康明斯发动机公司主要采用机械加工方法对发动机缸体、缸盖、曲轴、连杆等高附加值零部件进行尺寸修理，并更换其相关配件和附件，对发动机进行再制造生产。

美国再制造与资源再生国家工程中心重点研究再制造清洗技术、再制造零件的机械加工技术、产品的全寿命周期设计与再制造设计技术。此外，该中心还针对再制造产品的健康管理开发了相关的无损检测监测、评估决策技术与设备。德国拜罗伊特大学欧洲再制造研究中心主要开展了产品的再制造性、再利用率以及再制造全域的信息化物流与仓储管理研究。英国在再制造产品无损检测、自适应修复和寿命评估方面也开展了大量研究工作。

2. 国内再制造产业情况

我国已成为装备生产和使用第一大国，汽车、工程机械、机床、电子产品等社会保有量快速增长。仅以汽车发动机为例，预计未来 5 年年均报废、淘汰量将达到 300 万台，按 80％的再制造率，可实现销售收入 1 200 亿元。我国 2020 年 GDP 预计达到 40 000 亿美元，即使以美国 2002 年再制造的水平（GDP0.4%）作为我国 2020 年目标，则再制造产业年产值也将达到 160 亿美元。

我国再制造产业起步较晚，目前全国有 77 家再制造试点单位，涉及汽车零部件、工程机械、机床等 9 大领域，2010 年汽车零部件试点企业产值达 25 亿元。通过典型企业的再制造试点，我国在旧件回收、生产制造、流通体系建设及监督管理等方面均取得了积极成效。在技术创新发展方面，再制造基础理论和关键技术研发取得重要突破，已形成“尺寸修复、性能提升”的技术特色。

2014 年，内燃机全行业工业总产值 4 500 亿元，内燃机产品总产量 8 000 万台，总功率 20 亿 kW。截止到 2014 年年底，我国内燃机产品社会总保有量 4 亿台。随着内燃机产量和社会保有量快速增长，推进内燃机再制造具备基础和条件。

同时，报废内燃机附加值高，其重要零部件缸体、曲轴等主要失效形式为局部失效，如磨损、腐蚀等。国内外产业实践表明，与传统废金属回收利用处置方式相比，内燃机再制造能够回收报废产品所蕴含附加值的 70% 左右，节约能源消耗 80%，节约材料 70% 以上，降低制造成本 30% ～ 50%。内燃机再制造不仅可以减少废弃物，环境效益可观，而且节能节材，经济效益、社会效益也十分显著。

国家出台了《关于加强内燃机工业节能减排的意见》《中国内燃机工业“十二五”发展规划》《关于进一步做好机电产品再制造试点示范工作的通知》《内燃机再制造推进计划》等多项鼓励政策，为内燃机再制造产业发展提供了良好的政策环境。

截止到 2015 年 8 月，在国家发改委两批 42 家试点单位中，从事内燃机及零部件再制造的单位有 25 家；工信部机电产品再制造试点 35 家单位中，有 12 家涉及内燃机行业。《内燃机再制造推进计划》中的 40 家内燃机再制造重点工程示范企业进入了工信部第二批试点范围。经过多年的试点工作，内燃机再制造试点企业取得了实效，积累了经验，对中国再制造产业的发展起到了重要的示范引领作用。部分试点示范企业持续投入使再制造产业规模不断扩大，企业形成了各具特色的技术发展路线，初步形成了有效的回收、营销体系和运营模式，产学研用相结合得到了较充分体现， 再制造行业间的产业链合作得到了深入开展。

3. 再制造的工艺流程与装备

内燃机再制造是指将失效的内燃机进行集中拆解、零部件清洗、检测分类，按照原新产品技术规范要求，通过一定的工艺重新加工制造后，使再制造后内燃机产品的使用寿命及其动力性、经济性、环保性、可靠性等指标不低于原型机新机的标准要求。图 7-8 描述了一般内燃机再制造工艺流程。典型的内燃机零部件再制造工艺及其装备如表 7-1 所示。

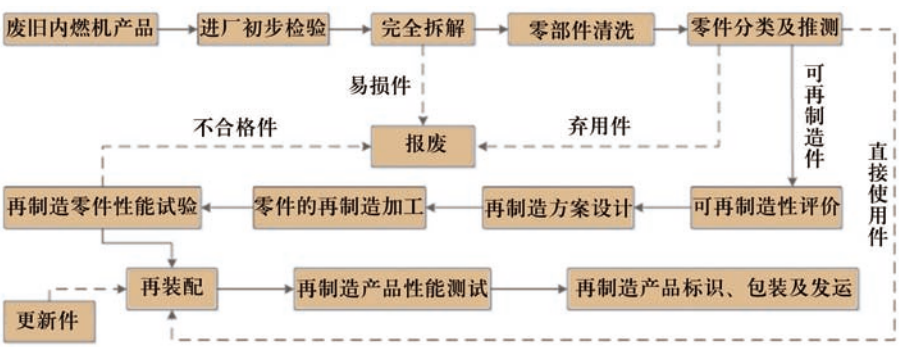


图 7-8　内燃机再制造一般工艺流程示意图

表 7-1　典型的内燃机零部件再制造工艺及其装备

工段	工序		工艺装备
再制造旧件的拆解与清洗清理	预清洗		对整机表面进行清洗处理
	拆解		再制造坯料精拆平台
	高温分解		高温分解炉
			悬挂式抛丸机
			清丸机
	高温高压水清洗		高压清洗机
	喷砂清理		干、湿喷砂设备
再制造旧件的无损检测	缸盖、缸体压力检测		缸盖试漏机
			缸体试漏机
	无损探伤		缸盖磁力探伤机
			缸体磁力探伤机
			曲轴磁力探伤机
	曲轴剩余疲劳寿命评估		曲轴剩余疲劳寿命评测设备
再制造毛坯的尺寸恢复	电刷镀	恢复静配合内孔尺寸	自动化纳米复合电刷镀设备
	微束等离子弧熔覆	恢复零件磨损、腐蚀等缺陷表面	自动化微束等离子弧熔覆设备
	高速电弧喷涂	恢复尺寸较大的静配合面	自动化高速电弧喷涂设备
	裂纹修补	修补大尺寸箱体类零件的微小裂纹	裂纹修补工具箱
再制造毛坯的精度恢复	缸盖加工	气门导管、座圈精密加工	缸盖精密加工机床
		磨气门密封面	气门磨床
	缸体加工	高精度镗缸孔	气浮镗床
		主轴承孔珩磨	卧式珩磨机
		缸孔珩磨	立式珩磨机
	连杆加工	大头孔珩磨	连杆珩磨机
		小头孔镗削加工	连杆镗床
	曲轴加工	曲轴磨削加工	曲轴磨床
	曲轴动平衡	检测、调整曲轴的动平衡	曲轴动平衡机
	平面加工	高精度平面磨、铣加工	缸体缸盖平面磨床
零件的工序间清洗			高压水射流清洗机

在再制造技术研发方面，近年来开展了针对再制造前废旧零件的缺陷、残余应力和剩余疲劳寿命等质量与性能指标的无损评价，研究了金属磁记忆、超声、涡流、声发射等多种无损检测评价理论和技术方法，获得了铁磁性金属零件剩余疲劳寿命的金属磁记忆无损评价模型和评价方法。围绕再制造成形层质量评价开展了缺陷、残余应力、接触疲劳寿命以及硬度等多指标综合评价体系和评价方法研究。

在再制造装备层面，初步建立了具有中国特色的再制造工艺装备体系，能够满足行业开展再制造的基本要求，工艺研究相对深入，与国外相比差距主要体现在相关装备品种少，可靠性亟待提高。例如，适合再制造成形技术工业应用的大功率光纤激光器和半导体激光器的性能稳定性和运行可靠性与国外尚存在差距，可满足移动式作业需求或现场再制造成形需求的大功率光纤激光或大功率半导体激光再制造设备系统的核心部件尚不具有自主知识产权。

7.8.2 发展重点

突出重点领域，尽快形成内燃机再制造产业化规模。根据内燃机工业发展现状，结合再制造技术特点，内燃机整机产品再制造重点领域是汽车发动机、工程机械发动机、农用机械发动机、船用发动机、石油钻井发动机、铁路内燃机车用发动机、固定式内燃机发电机组等，其中以柴油机为主；关键零部件再制造重点是气缸体、气缸盖、曲轴、连杆、凸轮轴、齿轮室、飞轮壳等；内燃机配套件再制造重点是增压器、发电机、起动机、机油泵、燃油泵、水泵等附加值较高的零部件。以整机、关键零部件和配套件再制造为基础，重点提升汽车、工程机械、农业机械、船舶动力、石油钻井动力、铁路机车用发动机及固定式内燃机发电机组等整机再制造产业化水平，积极推动内燃机配套部件再制造专业化、规模化发展。

加快技术创新，大力提升再制造技术能力和装备水平。紧紧围绕“再制造产品质量不低于原型机新品、最大化旧件利用率”两大核心目标，依靠科技创新，以高新技术为支撑，产学研相结合，加快建立具有中国特色的内燃机再制造技术装备体系（见图 7-9）。

以恢复尺寸、提升性能、提高再制造率为准则，加快推进内燃机再制造工艺装备研发及材料应用研究。在旧件拆解清洗、无损检测与寿命评估、修复、加工、质量检测与性能考核等再制造生产关键环节，加快关键共性技术的研发、推广和产业化步伐，尽快掌握、推广一批核心关键技术（见表 7-2）；加快推广应用纳

米复合电刷镀、高速电弧喷涂、微脉冲冷焊、微弧等离子熔覆等成熟的表面成形技术。重点突破内燃机再制造急需的损伤检测与评估、损伤修复及表面强化、损伤自修复和自愈、产品性能提升及再制造产品检测等技术。大力发展纳米复合电刷镀、等离子喷涂、高速电弧喷涂、微弧等离子熔覆、激光熔覆等自动化装备；研发无损拆解、绿色清洗、快速检测、寿命评估等专用装备；丰富完善适用于不同产品类型的再制造成形加工装备及专用材料；提升内燃机及其零部件再制造过程智能化程度和自动化水平，提高再制造技术装备水平、生产效率及产品质量稳定性。

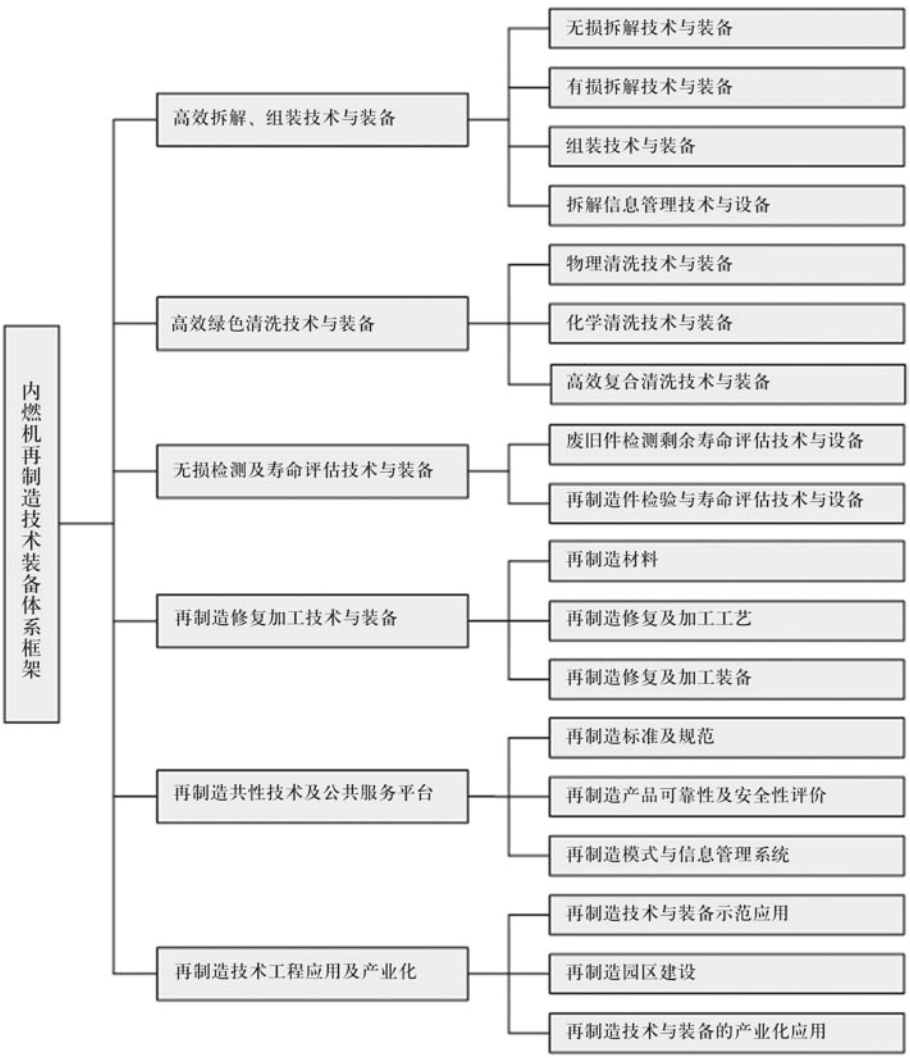


图 7-9　内燃机再制造技术及装备体系框架

表 7-2　内燃机再制造工程关键技术

序号	技术名称		技术特点
1	再制造毛坯的无损检测技术	再制造毛坯的应力集中与内部裂纹检测技术	利用金属磁记忆、涡流和超声定量测量技术，无损检测裂纹大小
		再制造毛坯剩余寿命评估技术	评估废旧零部件的剩余寿命与再制造零件的使用寿命
2	废旧零件的拆解及分类技术	废旧零件的高效无损拆解技术	用于报废车辆的拆解工作
		拆解零部件的快速分类技术	对不同用途及采用不同再制造加工技术的废旧零部件进行快速分类
3	废旧零件的清洗技术	环保高效物理清洗技术	对拆解前后的废旧零件进行无害化、无污染清洗
		高温、超声复合清洗技术	清洗拆解后的零部件表面及内部油污、锈迹、水沟、氧化物等
4	零部件尺寸恢复、性能提升技术	纳米电刷镀技术	修复零件表面缺陷
		高速电弧喷涂技术	修复零件表面缺陷
		微弧等离子熔覆技术	修复零件表面缺陷
		激光再制造技术	修复零件表面缺陷、提升零件表面性能
5	自动化再制造技术	自动化激光熔覆再制造技术	修复零件表面缺陷、提升零件表面性能
		自动化纳米电刷镀技术	修复零件表面缺陷，提高再制造生产效率
		自动化高速电弧喷涂技术	修复零件表面缺陷，提高再制造生产效率
6	再制造产品的质量检测技术	再制造涂层的表面检测技术	考察再制造产品涂层进行厚度及表面形貌检测，确保其致密无气孔和砂眼，无裂纹、起皮和剥落
		再制造涂层的性能检测技术	考察涂层与基体的结合强度，耐磨损、耐高温、防腐蚀、抗疲劳等性能测试
7	再装配技术	产品的快速无损再装配技术	结合合格的再制造零部件及部分新件重新装配成再制造产品
8	再制造产品质量检验技术	再制造产品整体性能测试技术	再制造产品（整机）的寿命预测

参考文献

[1] 谷玉川，赵若琳．汽车零部件再制造产业浅析 [J]. 机电工程技术，2013（7）:140-142.

[2] All-party parliamentary manufacturing group. Triple Win: The Economic, Social and Environmental Case for Remanufacturing. December 2014[N\OL].http://www.policyconnect.org.uk/apsrg/research/report-triple-win-social-economic-and-environmental-case-remanufacturing.

第 8 章

产业发展政策性措施建议

内燃机产业的发展必须以加强基础和关键核心技术研发、强化企业技术创新主体地位、推进技术创新型企业建设为主体，以国家重大战略需求和战略规划发展为制高点，建立和健全内燃机应用领域和用户要求的内燃机设计研发创新体系，发挥行业骨干企业的主导作用和高等院校、科研院所的基础作用，促进内燃机产业的健康发展。

8.1 提高创新能力

“十三五”期间，内燃机产业发展的驱动力是节能环保政策的实施，而实现节能环保必须加强基础研究和关键核心技术研发、强化企业技术创新主体地位、推进技术创新型企业建设。因此，“十三五”期间全行业应以国家重大战略需求和战略规划发展为制高点，以国家节能环保产业政策、法规为驱动力，充分运用“互联网 +”和智能制造的技术，充分发挥行业骨干企业的主导作用和高等院校、科研院所的基础作用，致力于创新的节能环保技术及产品的研发，努力将内燃机产业建设成为具有核心竞争力的战略性新兴产业。

8.1.1 提高法规创新能力

各类强制性技术法规、特别是油耗法规以及排放法规对内燃机的技术路线、成本、生命周期、投产节奏等有着决定性的影响，因此，法规所鼓励采用的技术路线、不同法规相互之间的匹配、法规发布和实施的时间差等方面必须是合理的。因此，如何通过法规创新，即实现国家节能环保政策的要求、同时又能保证内燃机行业的持续健康发展是“十三五”期间产业发展研究的重大课题。

“十三五”期间应协调、组织相关政府主管部门、地方政府部门、行业协会以及相关企业，解决当前相关技术法规由国家、地方或行业不同政府部门分管造成的法规技术不匹配、时间不匹配等问题给行业发展带来的问题。逐步创新建立符合中国国情的、适合各个地方要求的技术法规，摒弃照搬欧美法规的局面，形成法规不仅能够大力推进国家节能、环保的战略要求，而且能大力促进行业的健康发展和行业竞争力。创新的法规实现排放法规、油耗法规、燃油标准同步，排放法规、油耗法规与测试循环同步，实现各种法规发布与升级在时间节奏上同步。

8.1.2 提高体系创新能力

虽然我国内燃机产销量连续蝉联全球第一， 且年产销量在今后 15 年内，还将保持一定的增长速度。但是，面对越来越严格的油耗及排放法规，技术储备不足问题越来越凸显。由于工业基础薄弱，创新投入不足，我国内燃机产业整体与世界先进水平仍存在较大的技术差距。一直以来，国内内燃机行业不断在进行低水平的重复劳动，必须通过创新体系建设解决节能环保技术问题，而成立产业或技术创新联盟或创新联合体是进行体系创新、发挥行业整理合力、统筹引进外部资源的最佳途径。成立产业创新联盟就是要集中优势资源，形成合力进行共性问题攻关，以缩短我们在产业技术上的差距。不仅要鼓励技术联盟，更要鼓励产业联盟，实际上，形成产业联盟才是技术联盟持续健康发展的基础。

联盟的核心任务就是服务内燃机企业，按照企业的需求来开发技术和产品，并秉承开放优选的原则，集中业内最优势的资源进行技术攻关。联盟主要攻关技术方面包括节能技术、排放控制技术、电子控制技术、核心零部件技术等。

国家应在政策及资金上鼓励建立行业技术创新联盟，变补贴产品销售为补贴技术开发，安排专项资金鼓励产业技术联盟开发节能、环保技术，同时鼓励产业技术联盟通过以合作、引进或收购国外技术资源的方式加快相关技术的研发、消化吸收和推广应用。

“十三五”期间，国家应着重鼓励零部件企业合作建立相关的节能环保共性技术平台，从政策上、资金上鼓励零部件企业建立节能环保技术战略联盟，通过发挥各自的优势、并通过系统引进或并购国外先进的零部件开发技术资源，从根本上解决我国内燃机行业先进节能环保零部件技术和产品长期依赖国外供应商的局面，解决内燃机行业发展的关键核心问题，提高整个行业的核心竞争力。

8.1.3 提高内燃机动力系统的设计与制造服务创新

我国内燃机制造企业已越来越重视产品的自主开发。产品的自主开发对企业的产品设计与技术创新能力提出了更高的要求。面对市场的竞争，内燃机企业的产品设计、技术创新和服务创新能力必须进一步的加强。

内燃机属于中间产品，是载体。内燃机企业是为整车企业提供动力技术解决方案和服务的企业。内燃机产品的开发和匹配的能力标志着产品的技术水平，是内燃机企业的核心能力。内燃机企业的主要配套客户是各种领域的整车、整机企业。各种配套用户的需求不同，作为内燃机的生产企业应该系统地分析内燃机产品的服务对象，拓展内燃机动力系统的设计和服务创新内涵，运用“互联网 +”

信息技术，数据分析、智能制造等技术，丰富内燃机产品设计与技术创新能力，延伸内燃机的服务能力。通过企业的产品研发积累、产品的服务过程，建立内燃机制造业企业产品设计与服务创新体系，提高内燃机生产企业的产品设计、制造服务的创新能力。

8.1.4 提高零部件创新能力

中国经济进入减速增长的“新常态”，内燃机行业的发展增速也在下降，零部件企业的发展受到前所未有的冲击。但危中有机，一些有实力的零部件企业用业绩证明，只要早规划、重研发、真转型，还是能够寻找到发展的新机遇。目前存在的问题主要是：

1）外资汽车零部件企业在中国市场仍然高速增长，对我国市场的未来充满信心，继续保持技术上的领先地位，而自主产品依然处于劣势。博世、德尔福等众多外资企业都制定了在中国翻番增长的规划。经过多年耕耘，外资汽车零部件企业凭借技术优势牢牢占领了中国汽车配套高端市场。加之近年来，很多外资品牌零部件开始大幅降价，挤占原本属于自主零部件的低端市场，使自主零部件企业生存愈发艰难。一些投入巨大的新产品，如 ABS、电喷系统等，在外资产品大幅降价的情况下，价格优势被打压下去，推广非常困难。

2）整车企业对自主零部件企业的信任度下降，甚至有歧视行为。我国整车企业和零部件企业的整零关系矛盾由来已久，尤其是中、外资零部件企业被区别对待，更使自主零部件企业雪上加霜。比如，结算标准内外有别、不给参与公平投标的机会、不向本土企业投入产品开发费等，整车企业特别是自主整车企业在配套过程中的这些歧视性做法，让很多本土零部件企业寒心、无奈。自主品牌整车企业转型升级一个重要措施就是升级供应链，大量选用外资品牌零部件，越来越多自主整车企业的配套大门对本土零部件企业关闭。

培养强大的零部件产业，需要整车企业的觉悟。自主整车企业的命运与本土零部件产业的发展休戚与共，如果我国的整车企业和零部件企业继续保持这种整零关系，未来的中国汽车产业将存在严重危机。

3）零部件企业缺少政策的支持。中国汽车零部件行业缺少政策扶持是不争的事实。目前，我国的零部件企业无组织、无秩序，处于单打独斗的状态，是完全的自由竞争，政府应该发挥的积极作用基本看不见。近年出台的政策基本上都是针对整车的，最典型的是作为国家战略性新兴产业的新能源汽车，大额补贴全部划给整车企业，生产核心部件的企业却很难获得扶持。

4）体制机制存在较大问题，改革空间仍然较大。我国零部件企业的体制机制改革空间比较大，改革红利仍然存在。有的老牌零部件企业由于体制机制僵化，墨守成规，未能及时转型，导致边缘化甚至被淘汰。而大批民营企业和混合所有制的零部件企业，由于体制机制比较灵活，很多企业对市场反应敏感，适应能力强，目前发展状态良好。一些有理想、有追求的民营和混合所有制零部件企业战略目标明确、规划清晰，具有做成“百年老店”的决心和毅力。

8.1.5 发挥行业协会的创新引导作用

发挥行业协会的创新引导作用，提高企业的创新能力，提高产品的竞争力，做好以下工作：

1. 创新设计能力

以道路车辆和非道路移动车辆配套用内燃机为重点，开展创新设计示范，全面推广应用以绿色、智能、协同为特征的先进设计技术。加强设计领域共性关键技术研发，攻克信息化设计、过程集成设计、复杂过程和系统设计等共性技术，开发一批具有自主知识产权的关键设计工具软件，建设完善创新设计生态系统。建设若干具有世界影响力的创新设计集群，建设一批国家级专业化、开放型的设计研究机构，激发全行业创新设计的积极性和主动性。

2. 科技成果产业化

完善内燃机科技成果转化运行机制，在国家出台的促进科技成果转化和产业化的指导意见总体要求下，建立内燃机科技成果信息发布和共享平台，健全科技成果科学评估和市场定价机制，完善科技成果转化激励机制，完善科技成果转化协同推进机制，引导政产学研用按照市场规律和创新规律加强合作，鼓励内燃机制造企业建立一批从事技术集成、熟化和工程化的中试基地。

3. 内燃机制造业创新体系

完善内燃机制造业创新体系。一是要加强顶层设计，加快建立以创新中心为核心载体、以内燃机数据中心为重要支撑的行业创新网络。二是要充分利用国家和行业现有科技资源，围绕内燃机产业重大共性需求，采取政府与社会合作、政产学研用产业创新战略联盟等新机制新模式，建设一批内燃机创新中心，开展关键共性重大技术研究和产业化应用示范。三是建设一批促进内燃机协同创新平台，规范服务标准，开展技术研发、检验检测、技术评价、质量认证和人才培训等专业化服务，促进科技成果转化和推广应用。四是在已有的内燃机产品燃油消耗数据库的基础上，拓展建设内燃机工程数据中心，为企业提供创新知识和工程数据

的开放共享服务。五是面向配套主机所需的关键共性技术，建设一批重大科学研究和实验设施，提高核心企业创新研发的基础能力和集成能力，促进内燃机创新研发向价值链高端延伸。

在提升产业核心竞争力方面，要坚持做好以下几方面的工作。

（1）加快技术创新体系建设　通过国家科技计划（专项、基金等）和相关工程的渠道，加大对内燃机节能减排技术研发的投入力度。加强企业技术研究中心能力建设，推动建设一批内燃机工业国家工程研究中心，强化跨部门、跨行业产学研的结合，提高内燃机行业自主创新能力，加快突破内燃机产品节能减排关键核心技术，强化内燃机节能减排成熟技术的应用。加大人才培养力度，在关键技术领域培育一批领军人才，鼓励从海外引进优秀人才。

（2）推动政产学研用创新体系建设　建立内燃机行业创新链，优化集成科研力量，加强关键核心技术攻关，加快和促进成果转化。发挥内燃机政产学研用创新体系的作用，对重点产品和关键技术，开展专题联合攻关，实现技术成果共享，实现技术成果产品转化和市场应用。

（3）建立内燃机行业创新研发沟通、协调和服务机制　内燃机产品由于配套服务领域广泛，涉及多学科、多相关产业，做好协调服务、信息传递、反映行业发展需求和企业诉求尤为重要。开展此项工作须在政府和行业的支持下，发挥中国内燃机工业协会和相关产业协会的协调作用，协助政府做好行业发展规划，引导产业健康有序发展，为企业做好具有实效的服务工作。

（4）健全标准体系　以高效内燃机产品为主线，制定产品技术标准和相关标准，完善标准体系。制定替代燃料内燃机产品技术标准和内燃机再制造工艺技术、产品质量、生产管理等标准，对替代燃料内燃机和再制造产品发展进行规范。发挥企业在标准制定中的重要作用，支持组建重点领域标准推进联盟，建设标准创新研究基地，协同推进产品研发与标准制定。制定满足市场和创新需要的团体标准，建立企业产品和服务标准自我声明公开和监督制度。鼓励和支持企业、科研院所、行业组织等参与国际标准制定，做好标准的宣传贯彻，大力推动标准实施。

（5）加强行业自律和监督管理　发挥行业协会在加强行业自律、推广先进技术和经验、推动标准制定宣传贯彻等方面的作用。落实企业主体责任，充分调动企业的积极性和主动性。切实加强规范管理，强化监督检查，确保各项管理措施、法规标准得到严格执行。

4. 政策建议

（1）设立内燃机节能减排财政扶持专项基金　组织实施“工业强基示范应用工程”，通过奖励和风险补偿机制，支持核心基础零部件（元器件）、先进基础工艺、关键基础材料的首批次或跨领域应用。到“十三五”末期，40% 的核心基础零部件、关键基础材料实现自主保障，受制于人的局面逐步缓解，产业急需的核心基础零部件（元器件）和关键基础材料的先进制造工艺得到推广应用。建成较为完善的产业技术基础服务体系，逐步形成整机牵引和基础支撑协调互动的产业创新发展格局。通过财政扶持，对内燃机产品提前达到节能减排标准规定的制造企业，在企业技术改造、企业技术中心能力建设和科研开发等方面给予鼓励和支持。

（2）强化知识产权运用　加强内燃机关键核心技术知识产权储备，构建内燃机产业化导向的专利组合和战略布局。鼓励全行业运用知识产权参与市场竞争，培育一批具备知识产权综合实力的优势企业，鼓励和支持内燃机骨干企业与专业机构在重点领域合作开展专利评估、收购、运营、风险预警与应对。

（3）建立激励机制和出台激励政策　以节能减排为目的，设立“领跑者”激励机制，制定并出台内燃机产品燃油消耗率公告制度，对内燃机产品提前达到油耗标准给出的阶段目标值和满足排放法规要求的产品的制造企业，通过减免税政策和组织产品示范应用工程，鼓励企业生产制造高效内燃机，鼓励配套企业采用高效内燃机。对高耗能、高排放产品采用政策性手段强制淘汰，加快提高高效低排内燃机产品社会保有量结构比例。

（4）加大国家科技重大专项和重点研发计划支持力度　建议国家科技、工业和财政主管部门在研究和安排国家科技计划（专项、基金等）和相关工程中，对内燃机节能减排科技攻关和创新研发项目给予优先安排和支持；对内燃机高效应用替代燃料关键技术研发给予重视和重点支持。

（5）科学优化车辆产品公告和排放型式核准检测工作　将车辆产品公告和排放型式核准检测工作交由内燃机制造企业自行负责检测。一是有效减少企业组织实施上述检测认证工作的资金投入，便于企业综合协调安排；二是推动内燃机制造企业与配套整机制造企业，通过高效协同和协调合作，完成搭载和匹配标定，实现满足节能减排法规要求的产品快速市场投放；三是强化推动企业自律，提高企业技术进步的产业责任和环境保护的社会责任；四是探索我国车辆产品公告和排放型式核准检测制度改革，推动我国高效低排内燃机产品入市和开拓国际市场。

8.2 加快结构调整

《中国制造 2025》国发〔2025〕28 号指出，全球制造业格局面临重大调整，当前和未来一个时期，我国仍将面对复杂多变的国际环境和艰巨繁重的国内改革发展任务，国内经济发展环境发生重大变化，我国制造业发展必须紧紧抓住历史机遇，积极稳妥地应对内外部挑战。

内燃机工业作为国民经济发展的支柱性产业，其发展的内外环境也呈现出不同于以往的重要变化。内燃机工业必须依据《中国制造 2025》的要求，坚持“市场主导、政府引导；立足当前，着眼长远；全面推进、重点突破；自主发展、合作共赢”四项原则；贯穿落实“创新驱动、质量为先、绿色发展、结构优化和人才为本”五个方针；通过“三步走”战略，加快实现我国内燃机产业的结构调整。

实施产业结构调整，建设科学和可持续发展的中国内燃机工业制造体系，主要应做好以下几项工作：

8.2.1 完善产业发展政策

进一步完善产业发展政策。大力推进企业技术改造，确定支持战略性重大项目实施技术改造的指南和目标要求，建立支持企业技术改造的长效机制。支持高端产品、关键零部件、基础工艺和原材料进行技术改造。加强行业规范和管理，支持企业间战略合作和跨行业、跨区域兼并重组，优化产业结构，促进产业集约集聚。提高规模化、集约化经营水平，培育一批核心竞争力强的企业集团。

按照鼓励技术进步、规范竞争行为、促进节能减排和安全生产的原则，根据国家有关法律法规和产业政策，制定中国内燃机工业产业规范条件并组织实施。加强内燃机生产制造企业产品研发，稳定生产制造，实施科学质量管理，规范行业市场秩序，维护用户合法权益，保护内燃机制造企业科技投入的积极性。严把节能、环保、质量、安全关，推动提升内燃机工业技术水平，抑制低水平、重复投资建设；控制内燃机落后产能盲目扩张。

建立内燃机产品燃油消耗率公告制度，发布内燃机节能产品推广目录。严格执行淘汰落后产品制度，制定落后内燃机产品评价规范和淘汰产品目录，加快淘汰高耗能、高排放内燃机产品。严格执行机动车及发动机环保型式核准制度、机动车污染物排放标准。

鼓励和支持研发、生产、推广应用先进适用、安全可靠、节能环保的内燃机产品，建立健全内燃机安全技术标准与安全生产规程。对符合规范条件的制造企业，国家和地方各有关部门给予相关政策支持；鼓励以内燃机为配套动力的交通

运输、工程机械、农业机械以及固定装置的制造业优先选配。

在产业结构调整进程中，全行业要把提高内燃机行业创新能力建设，强化基础能力建设，加强质量品牌建设，全面推行绿色制造，推进企业国际化，以完善“互联网+”的网络化现代服务体系建设作为工作重点，深入推进产业结构调整。

8.2.2 领跑者计划与引领示范作用

在2014年北京APEC会议上，中国政府向全世界宣布了我国2030年CO_2排放达到峰值且将努力早日达峰的总目标。发布《内燃机产品燃油消耗率及测量方法》技术标准、组织实施《内燃机产品燃油消耗率公告制度》、设立“降低内燃机燃油消耗领跑者激励机制”，推动我国内燃机工业加大力度、加快速度，全面开展降低产品燃油消耗的工作，是实现上述总目标的重要举措。

通过出台和组织实施政策的激励和鼓励，推动制造企业加大对内燃机产品降低燃油消耗的研发投入、加速制造生产高效内燃机；鼓励道路车辆和非道路移动机械等使用用户广泛应用高效内燃机，在“十三五”发展期实现我国内燃机产品降低燃油消耗跨越式发展。按内燃机燃油消耗与国际先进水平缩小10%的差距计算，到2020年，高效内燃机产品市场占有率约为70%，年减少商品燃油消耗2 030万t（原油2 707万t）。到2025年，高效内燃机产品实现市场占有率100%，减少商品燃油消耗2 900万t（原油3 867万t）。此举即可以直接和有效地降低我国石油对外依存度，使之回归到50%的安全警戒线以内，还可以同步为实现降低CO_2排放总量目标做出贡献。

内燃机降低燃油消耗，潜力大、见效快。尽快设立激励机制和出台配套支持政策，建立领跑者计划将是一个非常有意义和效果明显的举措。

1. 领跑者计划的提出背景

国务院办公厅于2013年2月发布了《国务院办公厅关于加强内燃机工业节能减排的意见》（国办发〔2013〕12号文件）。在该文件的政策措施和建议中分别提出了出台《内燃机产品燃油消耗率及测量方法》、设立内燃机节能减排激励机制和配套政策。

“十二五”后期，为贯彻落实国办发〔2013〕12号文件提出的任务要求，发改委、工信部和财政部，通过组织实施的产业振兴和技术改造专项、工业强基专项、智能制造装备发展专项等，给予内燃机制造企业技改支持。

内燃机在降低燃油消耗和减少CO_2排放方面，潜力大，见效快，这是世界内燃机工业发达国家和地区的共识。

美国交通部和能源署联合组织了对内燃机产品降低燃油消耗项目专项支持政策。日本经产省和国土交通省长期开展了对节能产品实施“领跑者”制度。欧洲通过排放法规提出对内燃机产品非常严格要求的 CO_2 排放限值，换算过来就是燃油消耗的要求，同时，出台了不同方式的鼓励政策措施。韩国正在效仿美国的做法。

到目前为止，我国不论是中央政府还是地方政府，均未有针对内燃机产品降低燃油消耗所出台的激励机制和直接给予的财政支持政策，内燃机制造企业也从未获得任何类似的财政支持。

在 2014 年中国工程院组织的“内燃机节能减排发展战略”科技论坛上，苏万华、倪维斗、秦裕琨、黄其励四位院士联名提出建议：一是尽快修改、完善并严格执行内燃机产品油耗和排放法规；二是尽快建立科学、严格的内燃机和汽车燃油消耗和排放指标的监管机制和方法，把“产品申报，通过检测，批准投产”改为“企业申报，环保部门监督执行”；三是尽快完善激励企业自主创新的机制；四是建立以技术创新为目标的产学研协同创新体系。

2. 领跑者计划实施的必要性

在“十五”和“十一五”期间，国家对新能源汽车发展的高调宣传和高度期待，使我国内燃机工业的发展在国家政策层面，一直没有得到有力、强效的支持，产业始终处于被边缘化的地位，曾经一段时期内，甚至被工业领域的专业媒体称之为“夕阳”工业。

自 20 世纪末开始的这十几年间，中国内燃机工业节能减排工作的开展，在科研院校层面，只能依靠国家“973”“863”和自然科学基金以获得有限的研究课题项目；在产业层面，只能依靠企业自身有限的能力以维系最基本的工作。上述现状的直接后果，就是导致我国内燃机全行业的整体发展、内燃机产品燃油消耗技术水平、内燃机产品降低有害气体排放以减少对大气污染等方面，再一次持续拉大了与国际同行先进水平的差距。

制造企业创新研发高效内燃机产品，必须要采用先进和成熟的节能技术，选用优质的部件以支持实现内燃机的高效率；选用优质的零件以实现低摩擦技术，提高机械效率。

由于高效内燃机产品研发和生产制造的投入较大，致使产品初期投放市场不具备价格优势，直接影响了制造企业和搭载整车企业主动推广应用高效内燃机的动力。针对这一现象，中国内燃机工业协会曾经通过不同方式和渠道多次呼吁，

希望中央政府负责发展规划、工业、科技和财政等主管部门，针对发展、推广、应用高效内燃机所能获得的高额回报（降低燃油消耗以降低对外依存度，减少千亿元购买石油的经费），建议政府提出明确的目标，设立激励机制，配套财政支持，倡导节能减排。建立长效的降低内燃机燃油消耗和 CO_2 排放标杆产品领跑机制，即“降低内燃机燃油消耗领跑者激励机制”，激励和引导制造企业加快内燃机节能减排新技术和新产品的推广应用，持续提高内燃机产品能效水平，降低以内燃机产品为配套动力的汽车、工程机械、农业机械、船舶等各类装备的燃油消耗，为保障国家能源安全和积极应对气候变化提供有力支撑。

3. 激励机制

建立降低内燃机燃油消耗领跑者激励机制。由工信部、财政部联合组织、制定降低内燃机燃油消耗领跑者激励机制实施方案和推进计划。

财政部设立财政扶持（奖励）资金，对达到降低内燃机燃油消耗领跑者激励机制规定要求的产品和制造企业，给予相应的财政（奖励）支持。

在乘用车节能惠民补贴、农机工业财政补贴等政策的基础上，研究制定推广节能环保型商用车的财政扶持政策，带动高效内燃机的发展。研究完善节能环保型内燃机产品有关税收减免政策。完善老旧农机报废更新补贴政策，促进农业机械节能减排。对内燃机产品提前达到节能减排相关标准的企业，在企业技术改造、国家级企业技术中心能力建设和科研开发等方面研究按照规定给予奖励。

4. 预期的实施效果

通过建立“降低内燃机燃油消耗领跑者激励机制”，加之配套的财政扶植政策，可以有效地推动全行业开展高效内燃机产品的创新研发、生产制造、配套应用，以内燃机产品平均降低 10% 燃油消耗为目标，到 2020 年，高效内燃机产品市场占有率达到 70%，年减少商品燃油消耗 2 030 万 t（原油 2 707 万 t），CO_2 排放减少 6 400 万 t 的目标，为“十四五”降低内燃机燃油消耗的目标打好基础。

8.3 推动产业升级

内燃机产业是推动我国经济发展提质增效升级的主战场。随着新型工业化、信息化、城镇化、农业现代化同步推进，超大规模内需潜力不断释放，为我国内燃机产业发展提供了广阔的发展空间。迅速提升内燃机产业在重大技术装备创新、消费品质量和安全、国防装备保障等方面水平和能力。全面深化改革和进一步扩大开放，将不断激发内燃机产业发展活力和创造力，加快推进内燃机产业的转型升级。

8.3.1 实施“一带一路”战略

实施“一带一路”战略，是把我国对外开放推向新阶段的重大举措。内燃机是典型的全球化产业，在全球竞争中，只有充分利用国际资源和国际市场，更深程度地参与国际内燃机产业的合作与竞争，才能提高全球资源优化配置能力，在市场竞争中不断提升国际竞争力。当前全球内燃机产业正在发生着新一轮的国际产业分工转移，2008 年的国际金融危机、全球内燃机产业格局的变化，给中国内燃机企业提供了良好的整合国际内燃机资源（包括技术资源）的机遇。因此，在原有实施“走出去战略”成果的基础上进一步扩大成果是我们必须要开展的一项任务，是实现内燃机产品国际化、内燃机企业跨国化、加速内燃机产业结构优化的必要手段。

8.3.2 内燃机工业信息化的培育

在信息技术飞速发展的今天，数字化、信息化、智能化已经完全融入内燃机的使用和行业运营的全过程。内燃机电气化、自动化和智能化使得汽车更具有可操控性，能够满足现代人行驶、通信、办公等方面的需要，因此，内燃机工业的信息化能够帮助内燃机行业提高自身水平，提高产品竞争力，促进产品升级，从而最终促使整个行业相应地提高技术水平。企业内生产、加工、制造、物流和办公等领域的信息化会使企业运营成本下降，管理水平提高，减少人为的失误，保证企业正常有序的运行。所以，不管是从产品来说还是从企业角度来说，内燃机产业的信息化是内燃机产业结构升级的必由之路，是内燃机产业培育增长点的突破口，是内燃机产业实现强国梦想的关键途径。

8.3.3 内燃机节能减排基础能力建设

能源危机和环境污染已经成为制约我国国民经济发展的瓶颈，内燃机产业在这个问题中处于关键的角色。中国内燃机产业应从以下几个方面加强内燃机节能减排基础能力建设。一是要从国家层面上规范内燃机生产企业的生产实施准入机制；二是要从内燃机节能减排的特点出发，提出产业振兴转型升级国家财政专项，支持企业产品的技术改进；三是要坚持内燃机工业强基工程的组织实施，以提升产业链整体水平、加强基础领域研发创新、推动产用互动、强化关键零部件的研发能力和制造水平为目标，在内燃机节能减排的关键基础材料、核心基础零部件（元器件）、先进基础工艺、产业技术基础领域，实施工业强基工程，实现关键材料、核心零部件、整机、系统的协调发展，提高内燃机企业节能减排的基础能力。加大开发节能产品的开发力度，积极培育内燃机节能产品的市场，加快产业

化进程，实现低排放、节能型内燃机产品的可持续发展。

8.3.4 创新能力增长点的培育

1. 技术创新能力

面对日新月异的科学技术变革，面对日益强化的资源环境约束，面对以创新和技术升级为主要特征的激烈国际竞争，加快提高自主技术创新能力尤为重要，是推动产业结构优化升级的迫切需要，也是实现我国内燃机战略目标的迫切需要。近年来，中国内燃机制造企业通过与跨国公司开展合资合作或技术联盟，为培育自主创新能力奠定了基础，技术创新能力得到了一定提高。然而，对研发流程的掌控尚不到位，企业研发费用总量不足，重生产能力形成，轻创新能力提高，重引进消化吸收，重硬件投入轻基础研究，缺乏完整产品数据库，高端技术依赖跨国公司等问题导致我国自主技术创新能力薄弱，严重制约着我国内燃机产业的发展。

我国内燃机产业应通过加大对创新型人才的培养力度、构建内燃机工业自主创新体系和公共平台、加强对合资企业自主创新活动的引导，提高内燃机关键零部件核心竞争力，加强技术标准研究和知识产权保护等途径来努力培育自主技术创新能力，积极寻找某种非常规技术突破的契机，针对市场需求和消费者喜好对产品进行优化，生产新产品，进入国际市场与先进国家竞争，打造自主国际品牌，获得技术上的跳跃式发展，实现“局部超越”。

2. 管理创新能力

自主创新能力的培育，不仅指内燃机自主技术创新能力的培育，还包括管理创新的内容。由于我国正处于从计划经济到社会主义市场经济的转型阶段，经济体制改革的任务还远未完成。从内燃机制造大国到内燃机强国的过程不但要培育自主技术创新能力，还必须在企业管理体制、行业管理体制及政府管理体制上实现管理创新。管理创新的核心内容就是体制创新（包括组织、机构和制度创新），企业层面体现在公司化、集团化和证券化；行业层面体现在组建多种形式的产业联盟和公共服务平台；政府层面体现在向市场经济转轨中，其政府职能要转变为确定大政方针，设置明确稳定的竞争规则和调节市场的机制，尤其需要建立社会主义市场经济下运营国有经济及其他经济成分的制度性基础框架。管理创新的内容除上述外，还应包括文化创新的内容，如企业文化和企业社会责任等。自主管理创新能力的培育是与自主技术创新能力培育同等重要，甚至更为重要的基础性工作。

8.3.5 自主品牌培育

自主品牌的建立和发展，可使我国内燃机产业走上一条不断自主创新的道路，建立自主品牌是我国内燃机产业从内燃机大国向内燃机强国转变过程中的必经之路。没有自主品牌，就缺乏竞争，就缺乏技术升级的动力，也形成不了产业升级。

近年来，自主品牌内燃机产品所占的市场份额在逐年提升，在重型车和非道路移动机械等领域已经取得了一定的成就。但是，在乘用车尤其是轿车领域自主品牌所占市场份额较小，缺少具有国际竞争力的“精品名牌”产品，企业的规模依然偏小，研发资金投入不足，工程技术人员缺失等问题严重制约自主品牌企业核心技术快速提升到国际先进水平。应通过政策作用，着力向自主品牌倾斜，构建与发展内燃机产业自主品牌战略联盟，加大对自主品牌企业研发的扶持力度，鼓励自主品牌整机出口等路径支持内燃机生产企业通过自主开展联合开发、国内外并购等多种方式来提高自主品牌的国际竞争力。

8.3.6 内燃机零部件支撑体系建设

内燃机零部件是中国内燃机产业的基础，没有强大的内燃机零部件支撑体系就不可能实现内燃机产业的发展目标。当前，中国内燃机零部件产业的突出问题是自主研发能力低，关键零部件的核心技术基本控制在跨国零部件集团手中；在强势外资企业的挤压下，内资零部件企业的产品逐渐被边缘化；由于国内多元复杂的组织结构，目前国内尚未形成适应国情的协调发展的“整零关系”。内燃机零部件的发展，内燃机企业要发挥主导作用，政府要在政策上指导和扶持零部件大集团的形成、零部件自主创新和自主品牌建立等。

8.3.7 产品可靠性及质量保证体系建设

对内燃机产业来讲，产品的可靠性和质量保证体系是永恒的主题，而且是向社会承诺的首要保证，它不仅决定着企业的竞争能力和生存发展，而且关系着消费者的切身利益，关系到国家的荣誉、形象和可持续发展。随着我国工业化水平的提高，我国内燃机产品的质量水平已显著提高，涌现出一大批市场信誉度高、品牌竞争力强的优质产品。但是，由于存在着质量责任意识不强、产品标准滞后、监管指导不足等矛盾和问题，产品质量水平还不能完全适应国际市场竞争的需要。还必须将 “质量第一”的观念贯穿在整个产业结构优化的过程之中，坚持突出企业在质量管理和建设中的主体责任，推动企业建立全员、全过程、全方位的质量管理体系和质量诚信体系，把握好产品技术创新、新产品开发、质量提升、品

牌创建和服务改善这五个要点，做好内燃机产品可靠性及质量保证体系的培育工作。

8.3.8 完善和健全标准体系

制定内燃机产品燃油消耗限值及测量方法标准，明确燃油消耗率限定值、推荐值和目标值，达不到限值标准的内燃机产品不得生产、销售、使用。制定节能环保型内燃机产品技术标准，明确燃油消耗率及污染物排放技术指标，规范节能型产品分类。研究制定替代燃料内燃机产品技术标准和内燃机再制造工艺技术、产品质量、生产管理等标准，对替代燃料内燃机和再制造产品发展进行规范。开展行业能效对标活动，提高内燃机制造业能源利用效率。

8.3.9 内燃机现代服务业的培育

内燃机现代服务业是内燃机产业利润的重要来源，可以推动产业融合，促进就业，形成新的经济增长点。但我国内燃机服务业起步晚，基础条件薄弱，目前存在环境、管理、体系、人才、竞争、消费者认可度低六个层面上的问题。解决这些问题，需要政府、行业、企业的共同努力。政府需确立内燃机现代服务业在内燃机产业经济中的战略地位，制订其发展规划，并尽早布局新能源服务业；完善法制，为内燃机现代服务业发展创造有序竞争环境；推动内燃机金融、内燃机物流及二手市场的发展。行业应协助政府加强行业服务管理，规范市场秩序，增进企业交流，增强企业的自律管理，促进行业快速健康发展。企业要把握市场，提高服务质量，扩充后备人才，走品牌化、集团化之路。

8.3.10 强化监督管理

加强对节能减排政策法规及内燃机产品节能减排相关标准的宣传贯彻工作，切实加强准入管理，强化监督检查，开展落后产品淘汰制度、燃油消耗限值标准等执行情况的检查行动，确保各项管理措施、法规标准得到严格执行。

8.4 行业品牌建设

8.4.1 强化品牌建设

1. 增强品牌意识

内燃机行业内企业要把品牌培育作为产品质量和信誉建设的重要内容，明确品牌建设的重要意义，充分利用和发挥政策、资源和市场的导向作用，加强企业品牌建设。企业要进一步加强对品牌拉动效应的认识 —— 品牌不仅可以提升企业的知名度，更可以进一步拉动产品的市场竞争力。引导企业增强以质量和信誉

为核心的品牌意识。

2. 丰富品牌内涵

内燃机行业企业要开发切合实际的品牌管理机制和品牌塑造方法，建立品牌战略，实施品牌经营，培育品牌文化。对于实力雄厚、行业领先的企业，注重以企业集团为主体的企业品牌建设。企业要加强对品牌建设的统筹规划，在充分调研的基础上，制定企业品牌建设规划，并与企业产品市场规划有机结合。提高企业自身的品牌培育意识和商标注册、运用、管理和保护能力；采用先进的营销理论、品牌管理模式和方法，增强企业在市场调研、产品定位、营销策划、传播宣传、公关服务等方面的能力和水平。积极开展对国际标准和国外先进标准的研究，积极参与国际标准的制修订，提高企业适应市场和技术环境变化的能力。

对于内燃机关键零部件燃油喷射系统、后处理系统等在行业内具有显著影响的企业，从产品品牌建设入手进行品牌培育。对于掌握自主知识产权（发明专利）和核心技术、创新能力较强的企业，打造自主创新企业品牌。充分利用财税、金融等政策，加大在技术开发和质量提升等方面的投入，增强企业创新能力，提高产品质量水平。重视知识产权法律尤其是商标法律制度的运用，从战略、管理、传播和资产管理各个层面推进品牌建设。

3. 推动品牌发展

品牌的建立不仅有利于企业自身的发展，更会拉动整个行业的发展，通过产业链的辐射作用，推动行业上下游（供应商、客户）发展。按照“注重过程，在全产业链抓质量管理”的思路，引导企业从设计、采购、制造、销售、服务全过程提升质量品牌。以提高产品质量、可靠性、基础配套能力和品牌竞争力为重点，有计划地逐步解决关键性、基础性质量品牌问题。从而推动内燃机行业乃至内燃机配套行业全产业链的发展。

8.4.2 行业协会的作用

1. 引导和鼓励企业积极进行品牌建设

中国内燃机工业协会将积极组织制定内燃机行业品牌管理体系标准，积极配合相关部门制定发布内燃机行业品牌管理体系国家标准。鼓励企业执行严于国家和行业标准的企业标准，让标准成为对质量的“硬约束”。组织行业领先企业组织制定重点产品自我声明规范，引导企业通过自我声明形式明示产品质量水平。在行业内组织开展“品牌信誉承诺活动”，引导企业承诺并履行质量责任，依托中国内燃机工业协会官网，加强对承诺企业的宣传、监督和信息反馈，扩大质量

信誉承诺活动的社会影响。完善商品修理更换退货责任规定，探讨建立产品售后服务申诉平台，维护消费者合法权益。积极配合工商、质检、海关等部门开展监督、监管和查验等工作，提供技术支持，把好产品“市场关”“出口关”。

组织行业内单位加强交流沟通，相互学习借鉴工作经验。将品牌培育工作与地区经济发展有机结合，积极争取地方人民政府的支持。

2. 加强行业品牌培育

完善内燃机行业品牌培育工作制度，制定内燃机品牌培育示范企业、产业集群区域品牌建设示范区评价管理办法。开展行业内企业品牌培育试点示范工作，指导企业建立完善品牌管理体系，实现体系有效运行，遴选示范企业，宣传推广标杆企业典型经验，提升企业品牌培育能力。深化推进产业集群区域品牌建设，推荐遴选品牌建设试点单位，重点培育区域品牌建设示范单位，科学评价区域品牌运行水平，推广区域品牌建设成功经验。完善品牌专业人才培养工作模式，引导专业机构面向工业企业培养品牌专业人才。中国内燃机工业协会将积极组织行业内企业积极参加和支持中国质量协会及相关机构开展的全国品牌故事演讲比赛、品牌创新成果发布、工业企业品牌竞争力评价和发布、品牌力指数评价发布、品牌领袖峰会、全面品牌管理普及教育等活动。支持建立地区性、行业性品牌竞争力评价发布制度。组织行业内优秀企业参加国际质量品牌活动和国内外行业会议会展，树立中国内燃机企业质量品牌良好形象。

3. 深入开展行业自律和诚信建设

认真履行行业自律和诚信建设职责，在行业内广泛宣传“绿色制造，和谐共赢倡议书”和《中国内燃机工业自律公约》，规范行业企业行为，维护公平竞争的市场环境。继续在行业内深入开展行业企业信用评价工作，严格申报、评审、公示、复查等程序，实行信用评审动态管理和定期复评制度、积极探索创新，总结实践经验，大力推进行业自律和诚信建设。

8.4.3 职能部门的作用

1. 营造良好的社会和市场环境

要协调配合，打破地方保护，消除市场壁垒，减轻企业负担，构建国内统一市场。要加强对商业机构的指导和管理，拓宽品牌产品的销售渠道，为国内外工业企业创造同等品牌市场待遇。

加强跨区域内燃机企业品牌保护工作的分工协调；研究借鉴国外品牌保护的优秀经验，加强对我国工业企业商标境外注册、使用和保护情况的跟踪研究，分

阶段建立海外商标纠纷预警机制和危机管理机制。

要推动中国制造内燃机的品牌形象塑造，在重点市场和新兴市场举办产品展览、推广、广告等活动，促进提升品牌市场竞争力和品牌价值；鼓励企业在海外开展营销活动，引导企业积极进行商标国际注册；对企业在境外商标注册、渠道拓展等工作提供相关服务。

要探索建立企业品牌信用担保制度，积极拓宽企业融资渠道，支持符合条件的企业通过上市融资和发行债券；鼓励企业以品牌为纽带进行并购重组。加强对合资合作过程中企业品牌的保护和管理。

要加强质量监督、市场监管，组织开展专项整治活动，打击侵犯注册商标专用权违法行为，加大对企业行业商标专用权的行政保护力度，保护商标持有企业的合法权益。

要在“提高工业产品质量示范”“质量兴业”和“质量兴企”活动中，以品牌培育为重点内容，通过组织质量攻关和提高供应链质量保证能力等工作，支持品牌建设；要加快产品质量控制和技术评价能力建设，大力发展中小企业服务平台，为企业对外交流、信息咨询、技术咨询提供服务，发挥产品研发设计和品牌推广平台的作用。

2. 加强法规和规章制度建设

开展品牌法律法规研究，推动法规和规章立项工作。支持企业在区域或产业规划中，明确质量品牌工作的任务、目标和措施。在产业政策和规划中，加强对质量品牌的指导和要求。支持有关单位开展质量品牌工作与经济新常态、两化深度融合以及制造强国等重大课题的关联性研究，开展品牌运行指标的研究和评价活动。

3. 加强对品牌建设的指导和服务

要加强对品牌建设的具体指导。根据内燃机行业的特点提出内燃机品牌建设的指导性文件；指导企业建立完善品牌培育管理体系和评估体系，提高品牌培育的科学化水平，实现品牌培育工作的持续改进；支持企业积极参与国际优秀品牌管理经验和名牌的交流与分享；鼓励行业规范并推广与品牌培育相关的咨询和培训服务，加强对品牌工作的专业指导。

对品牌培育工作成效显著的企业进行重点扶持并给予适当的表彰奖励，以加大对品牌建设成功经验的宣传力度，推动品牌建设工作深入开展。

加强在品牌建设方面的鼓励和引导，建议对于重视品牌建设，在行业内具有

较高知名度和影响力，具有良好的口碑，顾客满意度高，相关投诉率低，诚信经营，信用记录良好的企业和品牌，在中国质量奖评选中优先考虑，并建议中国品牌建设促进会联合各有关行业协会、联合会，协调有关权威媒体对其品牌进行积极宣传报道。培育一批具有竞争力的知名品牌，提升各行业品牌价值，推进“中国产品向中国品牌转变”，在内燃机行业内积极开展品牌价值评价工作。

8.5 优化企业管理

8.5.1 现代内燃机企业的现状特点

从内燃机产品本身看，产品技术密集，新产品开发周期长且投入大。随着全球节能环保的法规约束，内燃机产品不断集成当前的新材料、新技术，使得产品自身不断升级和更新。同时，除内燃机本身的技术含量高以外，和整车匹配的应用开发，同样也是一个高技术含量和高投入的过程，而且这一过程将直接决定着内燃机产品的性能发挥。从这一点上看，内燃机企业可以说是为整车企业提供动力技术解决方案和服务的高科技型企业。内燃机只是其载体，产品开发和匹配的能力标志着产品的技术水平，是内燃机企业的核心能力。

从客户角度看，内燃机企业的主要客户是功能主机企业。内燃机企业主要作为整车提供动力解决方案和产品的供应商、伙伴或全资子公司，其发展和整车企业的战略和发展息息相关，这也决定其整个管理运营系统应该是如何更好地支持和服务整车企业，符合整车企业的供应链管理要求，并随之发展。同时，随着客户的多元化，促使产品发展也多元化，增加了独立自主型内燃机企业产品管理和多品种生产的难度。

内燃机产品具有技术密集、制造工艺复杂、多品种小批量生产等特点。对于内燃机企业来说，如何确保复杂工艺条件下的产品质量的一致性，需要企业的管理系统具备很好的整合协调各大管理要素和资源的能力。

国内内燃机企业的生产，基本上都是由关键件机加工、装配和测试三大工艺构成，也就是说，95% 以上的零部件来自于供应商或合作伙伴，如何开发、整合好整个供应链的资源，并优化整个物流体系，这将直接决定着产品的质量和成本。目前，在内燃机企业的整个供应链上，各企业能力参差不齐，主要分布在江浙沿海地区、长春、山东等地，外资独资企业控制着高技术含量和高附加值的关键核心零部件的制造和技术，如燃油系统零部件、ECM、涡轮增压器等；同时，外资零部件企业在近 10 年进入中国，占据了高附加值的零部件市场；国内内燃机零部件企业，主要是原国有改制和民营企业，主要从事低附加值的零部件生产，技

术积累继承不足，新产品的同步开发和项目管理技术薄弱，工程技术和管理人员专业程度还不够，生产的产品一致性缺乏保障。因此，供应链企业的风险在未来几年将会是内燃机企业持续良性发展的挑战。

内燃机企业同时还具有劳动力相对密集，并且对管理、技术、作业等各层员工的素质要求高的特点。随着人力成本的逐年上升，人才流动的常态化，人员流动性高影响了企业良性发展。如何建立人才培育和保留的能力及增强企业凝聚力，是企业的又一核心能力。

现代内燃机的设计，反映了对新技术、新材料的理解运用能力，内燃机零部件的制造水平反映了企业的装备和工艺能力，与整车的匹配技术集中反映了内燃机企业对产品和用户需求的了解深度，对上下游供应链的协同、整合能力。

8.5.2 内燃机行业的管理现状

国内内燃机企业主要有国内独立自主企业、整车厂全资企业和合作合资企业三种形式。合作合资的运营模式自 20 世纪 80 年代末开始，取得了较大发展，两个主要的驱动因素是，市场因素驱动国内内燃机独立企业和整车企业的合作合资，技术瓶颈因素驱动外资企业和国内整车企业的合作合资。

国内内燃机企业，如玉柴、潍柴、云内、全柴等，经历几十年发展，在管理上由原有国企的行政管理方式，转变为现代企业管理制度，并通过推动 ISO/TS 16949 技术规范的认证，实现管理升级，优化职能和过程管理，通过精益生产工具的运用，提升业务绩效。在产品技术管理上，积累和形成了自己的产品开发验证流程，但在核心技术如排放、电控、节能技术等方面，存在瓶颈，需要外部资源的合作。在产品同步开发和项目管理技术上存在差距，产品研发周期长、投入大。

属于整车企业的内燃机生产厂，运用了整车企业成熟的管理运营模式，如 TPS、GMS 等。在产品研发管理上，自主研发或合作、委托开发，并能和整车实现同步开发，项目管理能力强。在生产模式上，都从 TPS 或多或少吸取了营养，使用精益工具方法；由于产品独立配套于整车企业，发动机厂就相当于整车工序的下延，执行和整车同步的生产计划，消除了计划预测不准确带来的资源浪费，产品品种相对较少，可以进行大批量生产，易于实现标准化。属于整车企业的内燃机生产厂，具有其他企业无法比拟的质量保证和成本优势。

外资合资内燃机企业，如康明斯发动机，是技术和市场结合典范。企业的运营管理模式，完全复制外资母公司，能够完全获得外资母公司的全球技术资源的支持，有严谨的产品研发和项目管理流程，通过组建虚拟团队实现全球同步开

发和问题处理。在生产方式上，基于精益生产建立自己的运营系统，通过职能优异、6σ 实现持续改进。建立完善的全球产品数据系统，和各工厂的制造执行系统（MES）相连，通过发动机的 ECM 数据，可以实现对生产的控制。因此，相对来说，外资、合资内燃机企业产品技术水平较高，质量可靠，但成本和效率不存在优势。

总体来说，在企业运营管理上，各类型企业基本上都融合了 ISO/TS 16949 技术规范的要求，去构建业务流程、金字塔式职能展开的组织框架，并基于安全、质量、效率和成本实施目标管理，推进企业持续改进。同时，大部分企业都在导入精益生产、6σ 的工具以期提升运营绩效。总体上看，各大企业管理的方法上，不存在太大的差异，但在管理的运行上，基于不同的组织和文化，结果就不尽相同。

8.5.3 新形势下对内燃机企业运营管理的挑战

中国制造业经过几十年的发展，赢得了“世界工厂”称谓。我国的大部分制造企业仍然停留在产业链的最低端，产品技术跟不上市场的发展，管理粗放，质量水平低，利润微薄。从 2014 年开始，又面临着劳动力短缺、成本增加、产能过剩及全球经济疲软的挑战，来自全球的竞争正在逐步蚕食中国“世界工厂”的地位，低端制造正快速从中国向其他低成本国家转移，而高端制造向发达国家回流。总的来看，中国制造业正面临着巨大的下行压力，究其根源，中国制造业的问题在于大而不强。

再看全球的制造业，随着信息和互联网技术的发展以及人们的需求不断差异化，全球制造业正处在一个升级变革期。欧美、日本、印度等国家或地区正在着手考虑和规划自己制造业的未来，以提升国家的竞争力。德国提出的“工业 4.0”为我们提供了一个很好的借鉴。

“工业 4.0”利用物理信息交互系统（CPS）将生产中的供应、制造和销售信息实现数据化、智慧化，最后达到快速、有效、个人化的产品供应。它主要有三大核心主题：

1）打造“智能工厂”，建立智能化生产系统及过程，以及网络化分布式生产设施。

2）实现“智能生产”，推动整个企业的生产物流管理、人机互动以及 3D 技术等新一代的智能化生产技术在工业生产过程中的应用。

3）实现“智能物流”，通过互联网、物联网、物流网，整合物流资源，充分发挥现有物流资源供应方的效率，而需求方，则能够快速获得服务匹配，得到

物流支持。

面对全球制造业的升级变革，以及我国制造业大而不强的现状，我国也在积极思考和规划我们的制造业未来的发展和战略，并及时颁布了“中国制造2025”。

“中国制造2025”规划纲要本着创新驱动、质量为先、绿色发展、结构优化、人才为本的五大方针，提高国家制造业创新能力，推进信息化与工业化深度融合，加强质量品牌建设，积极发展服务型制造，从主要提供产品制造向提供产品和服务转变，发展个性化定制服务、全生命周期管理、网络精准营销和在线支持服务等。

在新的形势下，作为内燃机企业，面对制造业的升级发展，将会面临更多新的挑战。

首先，在产品研发上，内燃机作为中间产品，如何为整车的智能互联创造更多的价值。

第二，对于独立内燃机企业，如何应对产品多元化、个性化后市场的进一步细分，以及售后市场响应。

第三，在制造技术上，如何升级成为智能工厂，实现智能制造，并还能保持成本优势。

第四，在整个供应链上（包括对 OEM），如何实现智能物流，低成本的实现柔性和定制化生产。

第五，在管理和组织模式上，如何由集中式控制向分散式增强型控制的基本模式转变，以建立一个高度灵活的个性化和数字化的产品与服务的生产模式。在这种模式中，传统的行业界限将消失，并会产生各种新的活动领域和合作形式。

第六，面对智能制造的产业升级，我们的人力资源结构、人员的能力和观念、人才的培育体系是否能满足升级的要求。

8.5.4 优化企业运营管理的建议

面对全球制造业新的变革和挑战，如何进行产品设计，如何组织产品制造、提供相关服务，如何提速现有的物流模式，如何构建新的商业模式，如何变革自身的组织以适应新形势下的管理运营的要求等，对企业未来的发展至关重要。针对内燃机企业的运营管理，建议如下：

1. 建立面向市场和用户专门需求的内燃机动力系统设计研发、制造服务的创新能力

随着国际化市场的逐步确立，针对各地区、各部门对内燃机动力装置的不同

需求，内燃机行业要围绕市场需求，整合全国的资源，形成产学研用联合创新机制。提高行业内部同类产品生产企业的集中度。去除多余产能，针对行业发展急需的如电控和燃油系统、各类排放及质量控制检测设备等关键部件，组织科技攻关，补上短板，降低生产成本，真正使我国从内燃机制造大国迈向制造强国。

2. 明确产品定位，创新集成物理和连接功能，成为整车智能互联的核心部件，跨界拓展新业务

在内燃机原有的动力功能基础上，通过开发或扩展传感器、ECM 等元器件的功能用来收集数据，以增加更多信息收集功能和附加价值，实现物理部件和联接部件的集成，使带有“信息”功能的内燃机成为整车智能互联的核心功能和联接部件。

拓展新的业务，在带有“信息”功能的内燃机的基础上，开发整车全生命周期内的基于信息的服务产品，如为产品全生命周期服务、产品改进、产品的远程优化服务（根据内燃机实际磨合状态刷新产品数据定义，优化内燃机的运行）、整车的运营管理、远程诊断、预知性维护等提供支持。

拓宽新的商业模式，未来内燃机企业就是以解决顾客问题为主。企业不仅仅是进行内燃机的销售，而且要通过提供售后服务和其他增值的后续服务，来获取更多的附加价值。并在内燃机平台上，拓展更多、更丰富的服务，为整车企业、终端用户提出更好、更完善的解决方案，支持整车企业满足消费者的个性化需求，走服务软性制造 + 个性化定制道路。

为实现产品定位的转变和业务的拓展，在产品的管理上，建议：优化产品开发和项目管理流程，以适应在互联网环境下通过虚拟团队来完成设计任务，和为产品全价值链（包括供应商、OEM）同步开发和问题处理提供保障，缩短产品研发周期。导入 6σ 设计和实验技术，减少设计成本。运用 TRIZ 创新方法论，创新设计，同时实施产品专利规划管理。

3. 质量为先，创新制造技术，实现精益生产、智能生产

通过创新制造技术，以确保质量和生产一致性，并为实现智能生产夯实基础。建议：第一，建立制造执行系统（MES），实现全制造过程物理要素互联（主要是产品定义、装备工具、零部件），和支持服务业务互联（如设备运行、质量管控、生产控制、HR、成本管理等）。要满足智能制造、个性化定制（多品种）的生产，就需要制造装备、工具等功能执行站首先能识别产品定义和个性化的需求，因此需要升级制造设备、机器人、机械手和工具等，采用嵌入传感器和识别软件系统。

从而实现全制造过程的作业程序智能选择、控制、防错以及生产制造数据的管理分析。第二，确保生产设备零停机或短停机。建议实施全过程生产维护，通过传感器对生产设备的运行温度、震动、负载等工作特性实施动态实时监测，实现基于数据的预测性维护和设备全寿命周期的能力管理，以期达到设备零故障停机。同时，研究和开发故障快速诊断技术和软件（如总线诊断等），标准化的维修作业流程，以达到故障时的快速修复要求。在此基础上，开发独立的设备运行管理系统软件（MRS, 可以基于 Maxim 系统平台），并和 MES 联接 , 管理计划性维护（PM）、紧急维修（EM）工作和设备备件。第三，实现全产品生产过程和服务的质量信息互联（包括供应链和产品终端使用），建立基于质量信息和数据驱动的质量改进机制和流程。针对工厂的制造过程，基于质量信息系统，实现全制程质量的预防性管理，通过对全产品实现过程的各个要素的信息实时监控并可视化。第四，在工厂和制造的工程设计时，充分考虑精益生产的原则，将精益生产的理念融入在工厂和生产运营系统中。可以将产品特性需求定义分为产品常规需求特性和产品个性化需求特性，基于标准化、程序化、模块化、少人化的原则开发常规需求特性的工程实现要素，以实现最大化的生产过程的平衡；基于柔性化、智能化、易扩充性的原则开发个性化需求特性的工程实现要素，同时，可以考虑个性化特性的工程实现异地化（贴近 OEM 现场），或直接在 OEM 工厂实现产品和工程服务。在快速换模的基础上，研究开发智能工装、智能辅具、智能输送设备和技术，这将消除现有内燃机生产模式的很多约束，释放更多的柔性和潜能。第五，推广 6σ 工具的使用，逐步减少或消除全产品实现过程、生产要素等变差，以提升生产过程的一致性。

综上所述，基于 MES 平台，实现产品定义、设备工具、零部件互联，业务支持服务互联。以上建议方案，在一些外资合资的内燃机企业已经具备大部分的硬件基础，或已经实现并运行，只是在各系统的整合上存在差距，这主要是根源于职能管理的缺陷，和项目策划缺乏系统工程。

4. 建立供应链“互联网 + 物联网”，提升供应链的管理

开展网络建设，建议内燃机企业做好如下工作：第一，在供应商的选择评价上，增加对生产要素、信息和服务“互联网 + 物联网”的评价权重，并把对生产要素物理联接和业务服务互联的运行效果纳入到PPAP的验证。第二，通过互联网，随时共享所采购零部件的生产进展和质量状态，并建立异常和风险的反馈流程。第三，实现供应链新产品开发的硬件资源的物联网并共享，以更好地实现新产品

的同步开发和协同。第四，建立对供应链实施“互联网 + 物联网”的支持和服务的能力，以弥补现阶段供应链企业技术的不足。

5. 优化网络管理，提高效率

通过建立“互联网 + 物联网”，优化整个供应链（到终端用户）物流管理，从提高物流速度的视角改进，减少整个供应链的库存。通过精益工具的运用，提升工厂内物流的效率。建议做好以下工作：首先，基于“互联网 + 物联网”平台，实时掌握物品在整个供应链中的信息和流动状态。这还需要将除制造要素以外的仓库（到库位）、运输设备或工具、周转使用的包装物等服务功能实现互联。第二，需要从物流速度的视角，驱动改进，先实现均速物流，再提速，用物流速度来评价物流效益，而不是直接考虑消减库存。实际上，只有均速流动，才有零库存的可能。第三，开发利用社会物流仓储和运输服务资源，降低物流成本。第四，基于精益生产原则，在工厂内物流上，通过电子看板或物理看板，拉动物料的流动，而不是计划信息。

6. 引入系统工程，整合信息技术系统，深度挖掘数据价值

引入系统工程，整合信息技术系统，这是建立“物联网 + 互联网”，实现智能制造的关键。这也正是目前已经基本具备“物联网 + 互联网”的硬件条件的内燃机企业，不能发挥其作用而增加其价值的根本原因。建立并标准化信息的反馈流程，实现信息处理（管理行为）的及时性、一致性。因为信息是管理的基础，管理行动是基于信息的反馈，因此，还需要信息处理流程的状态和结果可视化，以实现问题解决的协同，和对信息处理的监控。挖掘整个供应链上各生产要素数据的价值，基于数据建立各业务的绩效分析模型，以驱动企业绩效的提升。

7. 推动组织的变革，打破现有的按金字塔式分层的职能型组织结构

建立基于信息平台的面向客户（包括内部客户）的服务型的任务小团队，并通过组建专业委员会或项目组的方式，提供技术的研发和支持。金字塔式分层的职能型组织结构，是基于一百多年前的泰勒科学管理和法约尔的组织管理的理论假设，管理细分成职能，策划工作和行动工作分离，统一指挥链（信息的传递），本质上，就是分权和授权的过程。在新的“物联网 + 互联网”的运营和管理环境下，信息是平的，世界是平的，所有的员工都可以随时随地地了解到工作想要的信息，只要给予足够的工作诱因，通过原有的指挥链来安排工作的职能就已经不是必需的了。因此，面对新的形势，建议推动组织的变革，做好以下工作：

第一，重新定义组织并转变组织的功能。在“物联网 + 互联网”的运行环境

下，将企业组织定义成一个平台，一个基于整个供应链全部展开的面向客户提供服务的平台，同时又是一个基于整个供应链全面展开的面向组织成员创造需求的平台。组织的核心功能就是平台文化和价值观的营造。组织本质就是创造客户。第二，组织的功能不再是工作任务的分派和监督，而更多的是发现解决问题、创造需求、创造工作，激发员工的各种能力，并且让员工的专长、兴趣和客户的问题有更好的匹配。也可以说，是组织创造了服务需求，员工在平台中找工作，而不是组织雇用了员工。第三，组织还要解决好自身的适应性问题（价值观、利益和行为）和系统工程问题，以保证员工的工作在平台中的匹配的平衡和效率，同时又促进在平台中工作的员工之间的相互协同。对于系统工程工作（如组织设计、信息系统架构设计、MES、质量保证体系等），可以考虑成立项目团队，或组建专业委员会等方式开展工作。

8. 提高员工的积极性、主动性

提高员工的职业精神和执行力，确保在打破原有的金字塔式职能型组织的指挥链后，还能保证并提高执行力，这将是企业能高效并持续运行的关键之举。

9. 调整人力资源结构，完善知识管理，培育关键技能人才，满足智能服务型制造的要求

基于智能服务型制造的特点，需要将金字塔型的人力资源结构，调整成橄榄型的人力资源结构。通过培训和学习，提升技术型员工的知识和技能水平，使之掌握产品开发、系统工程、“物联网 + 互联网”技术、MES 等技术。构建核心技术全球人才资源网络，通过服务购买、人力资源等方式，实现资源共享。